Abhängigkeit der Tonhöhenempfindung von der Lautstärke und ihre Beziehung zur Helmholtz'schen Resonanztheorie des Hörens

---

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde

der Hohen Philosophischen Fakultät
der Philipps-Universität zu Marburg

vorgelegt von

Georg Zurmühl
aus Burg a. d. Wupper

Marburg 1930

1930
Johann Ambrosius Barth / Leipzig

Gedruckt mit Genehmigung der philosophischen Fakultät
der Philipps-Universität Marburg

Tag der mündlichen Prüfung: 31. Juli 1929

Berichterstatter: Herr Prof. Dr. F. A. Schulze

Als Dissertation angenommen am 20. April 1929

Diese Arbeit erscheint gleichzeitig in der
Zeitschrift für Sinnesphysiologie Bd. 61, Heft 1

Inhaltsverzeichnis

Seite

Einleitung 41

Apparatur und Versuchsanordnung

1. Tonerzeugung 45
2. Eichung auf Tonhöhe 47
3. Stärkemessung
   a) Geräuschmesser 48
   b) Heterotone Phonometrie 50
   c) Röhrenvoltmesser 52
4. Klangzusammensetzung 54
5. Versuchsanordnung 55

Versuche und Ergebnisse

1. Hauptversuchsreihe
   a) Verschiedenheit der Lautstärkedifferenz 58
   b) Verschiedene Tonhöhenlagen 59
   c) Wirkung der Obertöne 61
   d) Sekundärton 63
2. Genauigkeit der Meßmethode 64
3. Nebenuntersuchungen
   a) Verhalten der Kombinationstöne 69
   b) Monotisches und diotisches Hören 71

Diskussion der Ergebnisse

1. Vergleich mit früheren Ergebnissen 73
2. Entstehung der Tonvertiefung 75
3. Mathematische Behandlung 77

Zusammenfassung 83

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547922_0015

Einleitung

Die Abhängigkeit der Tonhöhenempfindung von der Lautstärke ist seit langem bekannt und wird verschiedentlich in der physikalischen, physiologischen und psychologischen Literatur des vergangenen und gegenwärtigen Jahrhunderts erwähnt und behandelt (vgl. Nr. 1—15).[1] Im Rahmen dieser Arbeit betrachten wir die Wirkung, welche die Stärkeänderung eines Tones mit objektiv konstanter Schwingungszahl auf die Gehörsempfindung subjektiv verursacht. Von vornherein ist also jede Frequenzänderung der Tonquelle auszuschließen. Das Phänomen ist dann rein physiologisch-psychologischer Natur.

Im allgemeinen ist festgestellt, daß ein Ton bei geringer Lautstärke höher empfunden wird als bei großer. Nur wenige der vielen Beobachtungen der Autoren seien hier erwähnt. Wilh. Weber: „Der Ton der verhallenden Stimmgabel zieht sich etwas in die Höhe". S. Ringer: „Wenn eine Taschenuhr erst fest ans Ohr gedrückt und dann langsam fortgeführt wird, hört man das Ticken in der Tonhöhe steigen . . ." „Das Echo eines musikalischen Tones ist höher als dieser." E. Mach: „Ich stellte Versuche an mit Stimmgabeln, Zungenpfeifen, gedeckten und offenen Labialpfeifen, mit den Tönen der Violine und mit den nach der Methode von Helmholtz hergestellten sogenannten einfachen Tönen und zwar mit einer bedeutenden Anzahl sehr verschiedener Tonhöhen. Stets zeigte sich beim Entfernen des Tonwerkzeuges eine Erhöhung des Tones". C. Stumpf: „Dieselbe Tonhöhenänderung wie bei Gabeln habe ich kürzlich bei den durch starken Wind erzeugten Tönen einer Telegraphenleitung wahrgenommen. Auch hier schien beim Andrücken des Ohres an die Stange der verstärkte Ton zugleich tiefer." Durch zahlreiche Versuche wurde die Erscheinung der empfundenen Tonerhöhung beim Verklingen eines Tones bestätigt. Die empfundene Tondifferenz wird auf weniger als $^1/_8$ bis über $^1/_2$ Ton geschätzt. Burton schätzt den Unterschied bei einer Stimmgabel mit der Schwingungszahl 128 pro Sek. sogar auf eine kleine Terz oder mehr.

Andere Beobachtungen zeigen aber, daß die Erscheinung der Tonhöhenänderung für die Empfindung auch in der entgegengesetzten Weise auftreten kann. E. Mach: „Das Geklapper einer

[1] Die Zahlen verweisen auf das Schriftenverzeichnis am Schlusse der Arbeit.

kleinen Windmühle schien tiefer zu werden, wenn ich die Ohren mit den Fingern zuhielt." C. STUMPF: „Unter zwei qualitativ unmerklich verschiedenen Tönen wird selbst von Geübten der stärkere Ton leicht für den höheren gehalten." STUMPF glaubt sogar, „daß das Höherscheinen des schwächeren Tones nur in verhältnismäßig wenigen Fällen und die Täuschung vorwiegend in der umgekehrten Richtung . . . stattfindet". Über die Größe dieser entgegengesetzt empfundenen Tonhöhendifferenz ist nichts bekannt.

Man hat die Abhängigkeit der Tonhöhenempfindung von der Lautstärke auf verschiedene Weisen zu erklären versucht. Die Erklärungen ergänzen sich teils, laufen teils auseinander und befriedigen nur wenig. E. MACH erklärt die Erscheinung durch das relativ stärkere Hervortreten der Obertöne beim Schwächen oder Entfernen des Klanges. URBANTSCHITSCH faßt ebenso wie MACH die Vertiefung als Urteilstäuschung auf. Die Tonhöhenänderung ist für beide nur eine scheinbare durch die Änderung der Klangfarbe psychologisch bedingte Erscheinung. HESSLER versucht die Wirkung physiologisch zu erklären. Seine Erklärungsweise ist aber nach der heutigen Auffassung über Schallaufnahme durch das Ohr unhaltbar. Eine bessere Wendung gibt STUMPF der physiologischen Erklärung. Er bespricht und kritisiert die HESSLERsche Auffassung, hält aber an dem Grundgedanken HESSLERS fest, daß bei lauten Tönen nicht nur eine sondern mehrere Fasern der Basilarmembran erregt werden. (Die HELMHOLTZsche Resonanztheorie wird als bekannt vorausgesetzt. Vgl. WAETZMANN, „Die Resonanztheorie des Hörens", Braunschweig 1917.) Eine Faser schwingt am stärksten, die benachbarten schwingen schwächer mit. Beim Ausklingen einer Stimmgabel zum Beispiel wird die Erregung der Fasern geringer in der Art, daß die Erregungsstärke bei den Fasern für die tiefen Töne schneller abnimmt als bei denen für die höheren. Die Schwingungsstärke der letzteren nimmt demnach relativ zu. Darum geht der geschwächte Ton für die Empfindung in die Höhe, wobei allerdings vorausgesetzt ist, daß (der heutigen Auffassung entsprechend) bei der Erregung mehrerer Fasern nur e i n Ton empfunden wird und zwar der, welchem die stärksterregte Faser zukommt.

Besonderes Interesse gewinnt das Phänomen durch die Ausführungen von R. J. EWALD (14 u. 15), der eine eigene Theorie des Hörens, die „Schallbildertheorie" vertritt, welche sich in ausdrücklichen Gegensatz stellt zur bekannten HELMHOLTZschen

„Resonanztheorie des Hörens". Ewald bringt in seiner grundlegenden Arbeit über seine Hörtheorie eine größere Zahl von Einwänden gegen die Resonanztheorie. Besonderes Gewicht scheint er auf den hier zur Rede stehenden Intensitätseffekt zu legen. Er schreibt: „Die Tatsache, daß die lauteren Töne tiefer gehört werden, ist für die Schallbildertheorie von weitgehender Bedeutung, denn diese Theorie erklärt nicht nur die Erscheinung, sondern verlangt sie direkt". „Kann nun vielleicht auch die Resonanztheorie diese Erscheinung des Intensitätseinflusses auf die Tonhöhe erklären? Wie mir scheint, in keiner Weise. Die gleiche Zahl von Impulsen (natürlich auf die Zeiteinheit bezogen) kann immer nur auf den gleichen Resonator wirken. Wollte man aber eine Hilfshypothese machen und annehmen, bei den lauten Tönen seien die Amplituden der Resonatoren bereits so groß, daß ihre Schwingungen verlangsamt würden, so könnte ja nur ein höher gestimmter Resonator für den richtigen eintreten. Es müßte dann also nach der Resonanztheorie der lautere Ton höher klingen." „Für die Theorie des Hörens ist diese Tatsache von fundamentaler Wichtigkeit. Hier liegt doch ein greifbarer Unterschied zwischen dem objektiven Vorgang der Schallbewegung und der Auffassung derselben durch das Empfindungsorgan vor, und es kann keine Hörtheorie eine Erklärung dieser merkwürdigen Tatsache umgehen." Dieses Argument gegen die Helmholtzsche Theorie bildet den Ausgangspunkt der Arbeit.

Eine vorzügliche Auseinandersetzung mit den übrigen Einwänden Ewalds bringt Waetzmann in dem Handbuch der normalen und pathologischen Physiologie Bd. XI 1926 S. 667—700. Die Schallbildertheorie unterliegt wenn nicht stärker so doch in gleichem Maße den Schwierigkeiten, die sich der Resonanztheorie in den Weg stellen. Jedoch können die heutigen anatomischen Befunde und neuen Beobachtungen allgemein „als eine weitgehende Vertiefung der Grundanschauung der Helmholtzschen Resonanztheorie gelten" (vgl. Hdb. S. 526). Neuerdings sind von H. Held und F. Kleinknecht (16) Versuche angestellt worden, die mit starker Beweiskraft für die Resonanztheorie sprechen. Schlagende Bedenken gegen die Helmholtzsche Resonanztheorie bestehen zur Zeit keine — soweit eben eine physikalische Deutung der sinnesphysiologischen Erscheinungen überhaupt möglich scheint. Um so dringender erforderlich ist darum eine eingehende Untersuchung

von noch ungeklärten akustischphysiologischen Erscheinungen. Zu ihnen gehört die auf Anregung von Herrn Prof. Dr. F. A. Schulze vom Verf. neu untersuchte Abhängigkeit der Tonhöhenempfindung von der Lautstärke, die seit den Arbeiten von Ewald nicht wieder zur Diskussion stand und als belastend für die Resonanztheorie gelten mußte.

Wie aus der angegebenen vorliegenden Literatur hervorgeht, ist das über den Intensitätseffekt vorhandene Beobachtungs- und Versuchsmaterial sehr lückenhaft. Die Ergebnisse sind nicht eindeutig und geben kein klares Bild von den wirklichen Verhältnissen, zumal jede Angabe über die Intensität der verwandten Töne fehlt. Darum erwies sich eine systematische Untersuchung des Problems als notwendig. Die neuen Versuche wurden mit den exakten Methoden, welche die moderne Physik der Tonerzeugung an die Hand gibt, im physikalischen Institut der Universität zu Marburg durchgeführt. Sie sollen die Erkenntnis des physiologischen Einflusses der Erscheinung liefern. Dazu ist erstens nötig, jede objektivphysikalische Änderung der Schwingungszahl der benutzten Töne auszuschalten. Zweitens muß festgestellt werden, wieweit die von dem objektivphysikalischen Einfluß befreite subjektive Wirkung der Intensitätsänderung noch psychologische Ursachen hat. Die Untersuchung der Klangfarbe der benutzten Töne gibt darüber besonderen Aufschluß. Die dann isolierte Restwirkung ist physiologischer Natur.

Eine physikalische Erklärung des Zustandekommens der physiologischen Wirkung mittels der Resonanztheorie ist, wie im Folgenden gezeigt werden soll, entgegen der Behauptung von Ewald sehr wohl möglich.

Bei der mathematischen Behandlung der Fragen stellen sich begreiflicherweise Schwierigkeiten in den Weg; denn bei der immer noch mangelhaften Kenntnis von Einzelheiten des inneren Ohres, insbesondere der Basilarmembran, ist direkt nichts bekannt über Zahlenwerte und Materialkonstanten, die für die mathematische Auswertung erforderlich sind. Darum ist bei der Anwendung von mathematischen Theorien große Vorsicht geboten, zumal wegen der enormen Empfindlichkeit des Ohres die sonst unwesentlichen Umstände mit in Rechnung fallen. Bei unserem Problem handelt es sich um die Inkonstanz der Eigenfrequenz schwingender Systeme. Es treten mathematisch nichtlineare Beziehungen auf zwischen Elongation und wirkender Kraft, welche

ja auch bei den Kombinationstönen und dem Schalldruck eine Rolle spielen und selbst in der Technik z. B. bei den periodischen Bewegungszuständen von Maschinenteilen und bei verschiedenen Erscheinungen an elektromagnetischen Schwingungskreisen an Bedeutung gewinnen.

Gleichzeitig mit Fertigstellung dieser Arbeit erschien von Prof. Dr. E. R. Jaensch „Untersuchungen über Grundfragen der Akustik und Tonpsychologie" (43). Jaensch betrachtet die Frage der Hörtheorie von allgemeinerem, dem psychologischen Standpunkt aus und sucht „die verschiedenen biologisch im Hörorgan verknüpften Funktionen unter einen einheitlichen Gesichtspunkt zu bringen" gemäß seinem Satze: „Das Hören ist nicht nur Funktion eines physikalischen Apparates, sondern zugleich eine Lebensverrichtung". Er strebt eine Erweiterung des Helmholtzschen Resonanzbegriffes bis ins Höherseelische an und sieht in den Arbeiten von Ewald den ersten Schritt zu einem solchen Ausbau.

Ferner zeigen ganz neuerdings veröffentlichte sehr interessante Versuche von G. v. Békésy (44), daß die spezielle Helmholtzsche Form der Resonanztheorie, wonach die Querfasern der Basilarmembran als einzelne Saiten entsprechender Frequenz mitschwingen, vielleicht noch nicht den vollständigen Sachverhalt wiedergibt, obgleich sie so elegant die Tatsache der Klanganalyse ergibt, und daß neben der Ewaldschen Theorie noch andere experimentell gut begründbare Annahmen über die wahren Vorgänge auf der Basilarmembran möglich sind.[1]

Apparatur und Versuchsanordnung

1. Tonerzeugung

Im folgenden seien die Teilapparate für die Tonerzeugung kurz skizziert. Die Beschreibung der Gesamtapparaturanordnung folgt später (S. 55).

a) Tonsender. Benutzt wurden zwei Tonquellen von etwa gleicher Art. Es waren Röhrengeneratoren, die in bekannter Weise akustische Schwingungen von beliebiger kontinuierlich veränderlicher Frequenz lieferten. Der Wechselstrom wurde verstärkt und

[1] Herr Professor Gildemeister machte mich dankenswerterweise aufmerksam auf die Arbeit: Die Ewaldsche Hörtheorie, von Hans Koch (47), die ebenfalls einen wertvollen Beitrag zu den besprochenen Fragen liefert.

dann einem Lautsprecher zugeführt. Die Tonskala der benutzten Sender reichte von etwa 120—4000 Hertz. Bei Anwendung verschiedener Vorsichtsmaßregeln (17) erhielt man außerordentliche Konstanz der jederzeit reproduzierbaren Frequenz. Der Schwingungskreis bestand aus eisenfreier Spule von 4000 Windungen mit einer Selbstinduktion von 2,8 Henry und parallelgeschaltetem Stöpsel- und Drehkondensator. Der Stöpselkondensator setzte sich zusammen aus einer Reihe von „Minko"-Glimmerkondensatoren von je 400—6000 cm und einigen „Hydra"-Becherkondensatoren von 90000 cm (0,1 μF) im Gesamtwerte von rund 500000 cm. Der Drehkondensator hatte einen Kapazitätsbereich bis 1000 cm und besaß einen Zusatzkondensator von 0—100 cm. Geeicht wurden die Kondensatoren mit der Kapazitätsmeßbrücke der Firma Seibt mit der Meßgenauigkeit von 1%. Sie blieben mehrere Wochen mit dieser Genauigkeit konstant und wurden im Verlaufe der Versuche mehrfach nachgeeicht.

b) Verstärker. Da die Lautstärke des Tonsenders nicht ausreichte, wurde der Wechselstrom, bevor er in den Lautsprecher eintrat, durch ein Dreifachniederfrequenzrohr (Loewe) verstärkt. Um bei verschieden starker Stromentnahme eine Rückwirkung auf den Schwingungskreis, womit eine Tonhöhenänderung verbunden ist, zu vermeiden, wurde der Strom für das Verstärkerrohr an einem hochohmigen Potentiometer (5000 Ohm) abgenommen. Dadurch blieb die Tonhöhe bei nicht zu starker Kopplung mit dem Schwingungskreis vorzüglich konstant. Bei den meisten Versuchen wurde die Einstellung des erwähnten Potentiometers nicht geändert, sondern zur Tonstärkenänderung diente eine andere Potentiometeranordnung, welche am Ausgang des Verstärkers lag, eine Fein- und Grobeinstellung enthielt und keine Rückwirkung auf den Sendekreis zeigte.

c) Lautsprecher. Die Erzeugung tiefer Töne macht allgemein dadurch Schwierigkeiten, daß die handelsüblichen Lautsprecher mit festem Magnetsystem und schwingender Metallmembran die tiefen Töne nicht wiedergeben. Darum wurde ein für unsere Versuche gebauter elektrodynamischer Lautsprecher benutzt. Er bestand aus einem mit 7 Watt gespeisten Elektromagneten in Form der Topfmagnete, in dessen auf einen kleinen Raum konzentrierten Magnetfeld eine mit dem Sprechstrom beschickte Spule von 2000 Ohm beweglich war. Die Spule war befestigt an lose gespannten Bronzebändern (80:15:0,5 mm).

Ihre Schwingungen wurden durch einen starr mit ihr verbundenen Papierkegel vom Radius 15 cm und dem Öffnungswinkel von etwa 150° an die Luft übertragen. Die Eigenfrequenz des schwingenden Systems lag unter 100 Hertz. Bei dieser Konstruktion wurden die tiefen Töne gut wiedergegeben.

2. Eichung auf Tonhöhe

Für unsere Versuche war die Messung genauer absoluter Tonhöhen nicht erforderlich, vielmehr kam es auf genaue Kenntnis sehr kleiner Tonhöhen*differenzen* innerhalb je eines kleinen Bereiches um eine Grundfrequenz herum an. Die Grundfrequenzen wurden zum Vergleich mit im Institut befindlichen Stimmgabeln von R. König festgelegt bei 128, 192, 256, 435, 786, 1280, 2048, 3072 Hertz und berechnet nach der modifizierten Thomsonschen Formel (17).

Die kleinen Bereiche umfaßten je ein Gebiet von etwa $\pm 8\,\%$ Schwingungen der Grundfrequenz. In ihnen wurden die von der Grundfrequenz abweichenden Schwingungszahlen in Abständen von $0{,}05\,\%$ bestimmt. Dazu wurde für die Töne mittlerer Frequenz ausschließlich die Schwebungsmethode verwandt. Ein anderer Tonsender erzeugte einen Ton mit der jeweiligen Grundfrequenz, welcher mit dem fraglichen Ton des zu eichenden Senders Schwebungen hervorbrachte. Die Schwebungszahl wurde mit einer Stoppuhr ermittelt.

Für hohe und tiefe Töne reichte die Schwebungsmethode nicht aus, da bei ihnen die Schwebungen so langsam bzw. so schnell erfolgten, daß das Ohr ihnen nicht mehr genügend folgen konnte. Für sie wurde die rechnerische Ermittlung der Schwingungszahldifferenzen zu Hilfe gezogen. Variiert man die Kapazität C des Schwingungskreises um die kleine Größe d C, so ändert sich die Frequenz n um dn, und man erhält aus der modifizierten Thomsonschen Formel in Analogie zu Weller (18) die unbekannte Schwingungsdifferenz d n. Ein Vergleich von experimentell gefundenen Resultaten mit rechnerisch ermittelten Werten zeigt gute Übereinstimmung.

Die Abhängigkeit der Schwingungszahlen von der Kapazität wurde in Tabellen festgelegt, aus denen zu jedem Wert von C die zugehörige Schwingungszahl n abgelesen werden konnte.

Somit besaß man innerhalb der Tonskala von 120—4000 Hertz in genannten Abständen acht Bereiche, die je etwa $1^1/_2$ Ganzton

umfaßten. Innerhalb dieser waren die Schwingungszahlen in Abständen von 0,05 % bekannt und stets reproduzierbar.

3. Lautstärkemessung

a) Geräuschmesser. Zur Messung der Lautstärke der erzeugten Töne wurde ein Geräuschmesser nach Barkhausen (19 u. 20) von der Firma Siemens u. Halske benutzt. Er besteht aus einem Summer, der ein Telefon mit der Frequenz von etwa 800 pro sec. erregt. Die Lautstärke dieses Meßtones ist mittels eines Spannungsteilers auf genau bekannte Werte einstellbar. Die unbekannte Lautstärke wird in der Weise gemessen, daß man sie einem Ohre zuführt und mit der Lautstärke im Telefon des Geräuschmessers, das am anderen Ohre liegt, vergleicht. Der Meßhörer wird dabei auf solche Stufe des Spannungsteilers eingestellt, daß man beide Töne gleich stark hört. Die so gemessene Lautstärke ist an dem geeichten Apparat unmittelbar ablesbar

Die Stufe Null der Meßskala ergibt gerade den Schwellenwert für $n = 800$ Hertz, dessen Schallstärke Fassbender und Krüger (20) zu $38 \cdot 10^{-12}$ Erg (genauer Erg/cm^3) berechnen. Diese Schallintensität für den Schallwert nimmt Barkhausen als Einheit und bezeichnet sie mit „Wien“. Die folgenden Stufen der Skala sind nach Barkhausen derart abgeglichen, daß die Spannung im Meßhörer um jeweils 100 % steigt. Gleichzeitig steigen die „Wien“-Einheiten jedesmal um 100 %. Die Stufen selbst geben also eine logarithmische Einteilung (analog dem Weber-Fechnerschen Gesetz). Die Einheit der logarithmischen Skala (also der Stufen) bezeichnet Barkhausen mit „Phon“. Abweichend von Barkhausen legen Fassbender und Krüger der „Wien“-Definition nicht die Spannung am Meßhörer zugrunde, sondern die erzeugte Schallintensität. Da nun mit der am Meßhörer liegenden Spannung die Amplitude der Membranschwingungen proportional steigt und da die Schallintensität mit dem Quadrat der Amplitude zunimmt, erhalten wir eine Stufeneinteilung des Geräuschmessers wie es Zahlentafel 1 zeigt.

Die Zahlenwerte für Erg von Zahlentafel 1 weichen in ihrer Zugehörigkeit zur Stufe von den Angaben bei Fassbender und Krüger ab, weil die von ihnen mit Stufe 1 benannte Einstellung bei unserem Apparat mit Stufe 0 bezeichnet ist. Die Bezeichnung „0“ ist insofern für die erste Stufe zweckmäßiger als bei

ihr gerade die Grenze der Hörbarkeit liegt; d. h. die subjektive Lautstärke (in Phon gegeben) ist bei dieser Einstellung gerade Null, obwohl noch eine objektive Schallstärke von 1 Wien $= 38 \cdot 10^{-12}$ Erg vorhanden ist.

Zahlentafel 1

nach Barkhausen				Fassbender und Krüger
Stufe	Musikalische Bezeichnung	Phon	Wien	Erg/cm³
0		0	1	$38 \cdot 10^{-12}$
1		1	2	$15 \cdot 10^{-11}$
2	pp	2	4	$61 \cdot 10^{-11}$
3		3	8	$24 \cdot 10^{-10}$
4	p	4	16	$97 \cdot 10^{-10}$
5		5	32	$39 \cdot 10^{-9}$
6	mf	6	64	$16 \cdot 10^{-8}$
7		7	125	$62 \cdot 10^{-8}$
8	f	8	250	$25 \cdot 10^{-7}$
9		9	500	$10 \cdot 10^{-6}$
10	ff	10	1 000	$40 \cdot 10^{-6}$
11		11	2 000	$16 \cdot 10^{-5}$
12		12	4 000	$64 \cdot 10^{-5}$
13		13	8 000	$25 \cdot 10^{-4}$

Der Geräuschmesser gibt also ein bequemes Maßsystem für die Lautstärke. Die Stärkeskala wird für den Summerton 800 in bestimmte Empfindungsstufen unterteilt, die physikalisch durch die Definition der Wien- und Phoneinheit festgelegt und jederzeit reproduzierbar sind. Ob dabei die Stufen des Geräuschmessers um je das „Gleiche“ der empfundenen Lautstärke auseinanderliegen, ist schwer zu beurteilen; denn durch subjektives Vergleichen kann man z. B. nicht sagen, ob eine bestimmte Stärkeempfindung das 1-, 2- oder 3fache einer anderen ist, obwohl gewisse „Typen“ oder „Kategorien“ verschiedener Stärkegrade unterscheidbar sind. Diese „Kategorien“ wendet C. Stumpf (21) an, um den Lautstärkebereich in bestimmte Stufen zu teilen und die so erhaltenen Teilbereiche wieder zu unterteilen. Zum Vergleich mit der Stufenteilung der Zahlentafel 1 sei die Stärkeeinteilung nach Stumpf wiedergegeben:

$^1/_8$,	$^1/_4$,	$^1/_2$,	$^3/_4$,	1,	$1^1/_4$,	$1^1/_2$,	$1^3/_4$,	2,	$2^1/_2$,	3,	$3^1/_2$,	4,	$4^1/_2$,	5
				pp				p	mf	f		ff		fff

Zu beachten ist, daß der Geräuschmesser subjektive psychologisch-physiologisch bedingte Lautstärken von Geräuschen zu messen gestattet, aber nicht objektive Schallintensitäten, denn es ist nicht möglich, jede gemessene subjektive Stärkeempfindung ohne weiteres in Beziehung zur physikalischen Schallintensität zu setzen; Zahlentafel 1 gibt nur für den Ton von 800 Hertz einen Überblick über das Verhältnis von Lautstärke zu Intensität. Besondere Abweichungen treten auf einerseits durch das Vorhandensein von Obertönen (21—24) und andererseits durch die verschiedene Empfindlichkeit des Ohres für verschiedene Tonhöhen.

Über die Empfindlichkeit des Ohres ist in diesem Zusammenhang zweierlei zu sagen. Einmal ist die Schwellenempfindlichkeit des Ohres für verschiedene Tonhöhen sehr verschieden; denn ein Klang mit einer von 800 Hertz verschiedenen Frequenz besitzt für seinen Schwellwert nicht die Schallintensität $38 \cdot 10^{-12}$ Erg, wie es bei dem Meßton von 800 Hertz der Fall ist, sondern die Schwellenintensität ist in diesem Falle eine andere. Zweitens nimmt die subjektive Lautstärke eines tiefen Tones bei gleichem objektiven Intensitätszuwachs schneller zu als bei einem Ton mittlerer Höhe (800 Hertz). Das hat zur Folge, daß bei einem Klang z. B. mit der Hauptfrequenz 100 Hertz und einer Lautstärke von beispielsweise 3 Phon = 8 Wien durch das Schwächen des Telefonstromes auf den achten Teil durchaus nicht der Schwellwert des gemessenen Klanges, welcher in diesem Falle größer ist als $38 \cdot 10^{-12}$, erhalten wird wie es eigentlich der Phon- und Wieneinheit entspräche. Wir stoßen hier also auf Schwierigkeiten, sobald wir den Geräuschen und Klängen eine Hauptfrequenz zulegen. Für die Messung von Geräuschen mag diese Ungenauigkeit der Zuordnung von Phon und Erg erlaubt und in der Praxis der Geräuschmessung weniger von Belang sein. Für die Lautstärkemessung von reinen Tönen hingegen ist eine solche Ungenauigkeit notwendig zu beseitigen. Zu diesem Zwecke ist eine Korrektur der Definition der Phon- und Wieneinheiten vorzunehmen, wie sie weiter unten geschildert wird (S. 54). Zuvor muß jedoch kurz auf die Möglichkeit des Lautstärkenvergleichs von Tönen verschiedener Höhe eingegangen werden.

b) Heterotone Phonometrie. Die Stärkemessung reiner Töne von 800 Hertz mit dem Geräuschmesser vollzieht sich ohne Schwierigkeit. Die Schwierigkeit der Vergleichsmessung nimmt aber mit der Entfernung der Frequenz des zu untersuchenden

Tones von der des Vergleichstones (800) immer mehr zu. Man steht hier vor analogen Schwierigkeiten wie bei der heterochromatischen Photometrie (26) in der Optik und könnte in diesem Zusammenhang von einer „heterotonen Phonometrie“ (Stärkemessung von Tönen verschiedener Höhen) sprechen (nach einem Vorschlage von Herrn Prof. Dr. E. Lommatzsch). Ihre Möglichkeit könnte zunächst wie seinerzeit die der heterochromatischen Photometrie bezweifelt werden. Die Versuche mit dem Geräuschmesser (vgl. die angegebene Literatur) haben aber ergeben, daß ein Stärkevergleich von Klängen und Geräuschen verschiedenster Art sehr wohl möglich ist. Man kann in der vergleichenden Geräuschmessung sogar zu großer Meßgenauigkeit gelangen.

Der Stärkevergleich reiner Töne verschiedener Höhe ist nicht so „angenehm“ wie die Stärkemessung von Geräuschen. Das wird m. E. seinen Grund mit darin haben, daß die Tonhöhenempfindung eines bestimmten reinen Tones ganz eindeutig gegeben ist; sie steht sozusagen unvermittelt neben der Höhenempfindung eines anderen Tones; es besteht keine eigentliche Beziehung zwischen den beiden. Bei Geräuschen und Klängen aber sind schon eher Anhaltspunkte für die „Ähnlichkeit“ der Empfindungseindrücke und somit für die Gleichheit der Lautstärken vorhanden; die zu vergleichenden Geräusche und Klänge können etwa eine ähnliche Klangzusammensetzung untereinander haben oder sie können Teiltöne bestimmter Frequenz gemeinsam besitzen; beides wird zu einer größeren inneren Befriedigung der Versuchsperson (Vp.) beim Einstellen auf gleiche Lautstärke beitragen. Die Schwierigkeit der heterotonen Phonometrie wächst überhaupt „je mehr und größere Verschiedenheit in den begleitenden Bewußtseinsmomenten vorhanden ist“ (Stumpf) (9, S. 348).[1]

Analog den Verhältnissen in der Farbenmetrik (25) ist es zur Erlangung einer Lautstärkedefinition zweckmäßig, von dem „monotonen“ Lautstärkevergleich (Stärkevergleich bei gleicher Höhe) zunächst zur „fast monotonen“ Phonometrie oder Phonometrie in kleinen Stufen und dann erst von dort aus zur „stark heterotonen“ Stärkemessung überzugehen. Das Einstellen von Tönen gleicher Höhe auf völlige Gleichheit (Ununterscheidbarkeit) der Stärke ist mit relativ großer Genauigkeit (10 %) möglich.

[1] Vgl. bei E. R. Neumann (45), die Auseinandersetzung (S. 180—184) über vergleichende „Metrik“ (Tonmetrik) verschiedener Mannigfaltigkeiten.

Dadurch, daß man eine geringe Verschiedenheit der Tonqualitäten (Tonhöhe) wählt, wird die Möglichkeit genauer Einstellung auf gleiche Stärke nicht behindert. Mit der Verschiedenheit der Tonhöhen können wir dann von Stufe zu Stufe weiterschreiten, indem wir dabei den der Farbenmetrik analogen Satz bilden: Zwei Töne, die mit einem dritten gleichlautstark sind, müssen es auch untereinander sein. Auf diese Weise können wir zu gleichen Lautstärken von Tönen gelangen, die immer größere Qualitätenunterschiede (im Falle reiner Töne Höhenunterschiede) untereinander aufweisen.

Für die Praxis der Lautstärkemessung war es interessant, ob man ausgehend von einem Anfangsston bestimmter Höhe h_1 und Stärke s stets zu einem Endton anderer Höhe h_2 mit der gleichen Lautstärke s gelangte, gleichgültig ob man viele Zwischenstufen wählte, wobei man stets für die Einstellung völlige Gleichheit (Ununterscheidbarkeit) benutzte, oder ob man ohne Zwischenstufe direkt auf Empfindung größter Ähnlichkeit einstellte. Die zur Orientierung unternommenen Versuche ergaben, daß man auf beiden Wegen zu derselben Endeinstellung kommt. Die ersten Ergebnisse zeigten zwar oft größere Differenzen, aber die Meßfehler wurden nach einiger Übung geringer, so daß man bald eine gewisse Sicherheit im Einstellen auf gleiche Lautstärke bei verschiedener Höhe erlangte. Systematische Untersuchungen der vergleichenden Lautstärkemessung bei verschiedener Höhe sind in Aussicht genommen. — In der Farbenmetrik wurden auf Anregung von Cl. Schaefer im hiesigen Institut von A. Gibsone (26) ähnliche Versuche durchgeführt, welche die theoretischen Erwägungen von E. Schrödinger über die prinzipielle Möglichkeit einer heterochromatischen Photometrie experimentell prüfen und erfüllt finden. —

c) Röhrenvoltmeter. Durch die Einführung des Phon als Lautstärkeeinheit ist die Stärkeskala für einen Ton von 800 Hertz in 14 bestimmte Empfindungsstufen eingeteilt. Mittels der heterotonen Phonometrie ist man nun im Stande, ebenfalls 14 Stufen je der gleichen Empfindungsstärke schrittweise für die übrigen Tonhöhen zu finden. Auf diesem Wege kommt man für alle Frequenzen zu einer Tonstärkeneinteilung in bestimmte Phoneinheiten.

Die Messung der jedesmal für eine bestimmte Stärkestufe bei gegebener Tonhöhe notwendigen Spannung am Lautsprecher gibt

eine Kontrolle über die zugehörige objektive Schallintensität. Für unsere Versuche wurde die relative Spannung mit einem Röhrenvoltmeter gemessen. Die verstärkte Wechselspannung des Sendekreises führte zu einem Transformator. Die transformierte Spannung lag an dem Gitter des Verstärker- und Gleichrichterrohres; das Gitter seinerseits hatte eine negative Vorspannung derart, daß der Anodenstrom bei unbelastetem Gitterkreis gerade verschwand. Eine an das Gitter gelegte Wechselspannung verursachte dann einen gleichgerichteten Anodenstrom, dessen zeitlicher Mittelwert an einem Milliamperemeter abgelesen wurde. (Auf genügende Linearität der Charakteristik der Kathodenröhre ist zu achten.)

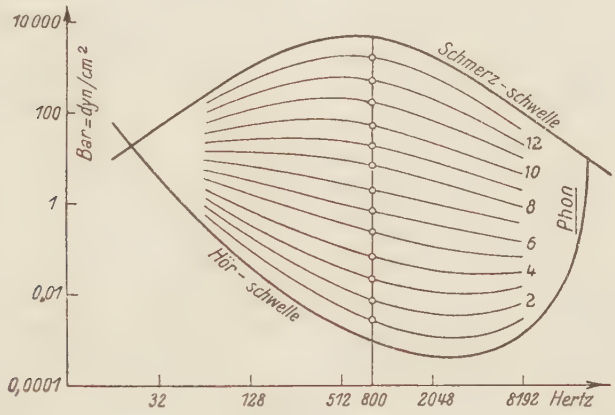

Abb. 1

Nach Definition gibt das Lautstärkemaß in Wien an, „auf das wievielfache man den Strom im Telephon schwächen kann, bis die Grenze der Hörbarkeit, der Schwellwert, erreicht ist". Unsere Spannungsmessung mit dem Röhrenvoltmeter zeigt in Übereinstimmung mit der gegebenen Überlegung (s. S. 50), daß außer für die Frequenz 800 (wie beim Geräuschmesser) bei reinen Tönen diese Definition des „Wien" nicht mehr zutrifft. Jedoch wird mittels vergleichender Lautstärkemessung jedem Ton eine bestimmte Stärkestufe in Phon- und Wieneinheit zugeschrieben.

In der von Fletcher angegebenen Hörfläche (27), welche umschlossen wird von der Schwellwertkurve der Gehörsempfindung und der Schwellwertkurve für die Schmerzempfindung bei sehr starken Tönen, ist jedem Punkt ein hörbarer reiner Ton von bestimmter Höhe und Stärke zugeordnet (s. Abb. 1).

Auf der Abszissenachse sind die Schwingungszahlen in Hertz, auf der Ordinatenachse die Schallstärken in Bar (dyn./cm²) logarithmisch aufgetragen. Für den Abszissenwert 800 Hertz erhalten wir das Stärkemaß in Phoneinheiten, wenn wir die zugehörige Ordinate zwischen oberer und unterer Schwellwertkurve in 14 Stufen von gleichem Abstand teilen (wegen der Zuordnung: Phon = log Wien = log Stromspannung).

Mittels der vergleichenden Schallstärkemessung erhält man Kurven gleicher Lautstärkeempfindung von etwa der Art wie sie in das Hörfeld (Abb. 1) eingezeichnet sind. Sie wurden in der Abbildung nur schematisch in der Weise konstruiert, daß man für jeden Abszissenwert die zugehörige Ordinate zwischen den beiden Schwellwerten in 14 gleiche Abschnitte zerlegte und die derart gefundenen zugehörigen Teilpunkte miteinander verband. Jedoch stimmen die Kurven mit denen durch vergleichende Stärkemessung zu gewinnenden in ihrem Verlauf annähernd überein. Ähnliche Kurven fand Kingsbury bei seinen Lautstärkemessungen (28) [vgl. auch Mac Kenzie (29)]. Meines Wissens fehlen bis heute genauere Messungen über subjektive Lautstärke von Tönen. Aus oben Erwähntem sehen wir jedenfalls, daß wir uns bei der Verwendung des Röhrenvoltmeters hüten müssen, bei Einstellung auf bestimmte Lautstärke für jede beliebige Höhe in der Weise verfahren zu wollen, wie bei der Eichung des Geräuschmessers mit dem Ton 800 Hertz verfahren wird. Darum sei für unseren Fall die Definition der Lautstärkeneinheit ausdrücklich folgendermaßen korrigiert: das Lautstärkemaß in „Wien" eines reinen Tones von beliebiger Höhe gibt an, auf das wievielfache man den Telephonstrom eines Tones von 800 Hertz mit gleicher Lautstärkeempfindung schwächen kann, bis sein Schwellwert erreicht ist.

4. Klangzusammensetzung

Die Sinusform der Schwingungen war durch die Art der Erzeugungen einigermaßen garantiert; jedoch waren den Grundschwingungen noch ganzzahlige Vielfache der Grundschwingung überlagert. Zur Erzielung „reiner Töne" mußte die Stärke der Obertöne auf ein Minimum herabgedrückt werden. Dies geschah durch geeignete Heizung des Senderohres und richtige Steuerung der Verstärkerröhre. Außerdem befanden sich am Ausgang des Verstärkers parallelgeschaltete Kondensatoren, welche die Schwin-

gungen hoher Frequenz drosselten. Die Kondensatoren waren auswechselbar und wurden in einer Größe bis zu 0,5 Mikrofarad benutzt. Der so gereinigte Wechselstrom wurde in dem geschilderten Lautsprecher unverzerrt in akustische Schwingungen umgesetzt.

Bei manchen Versuchen wurde die Schallenergie den Versuchsohren frei durch den Raum zugeführt, bei anderen wurde sie durch eine kurze Rohrleitung dem Ohre direkt zugeleitet, drang also gar nicht in den freien Raum. Letztere Anordnung gab ein Mittel in die Hand, die erzeugten Töne weiter zu „reinigen".

Zum Zwecke solcher „Reinigung" waren mit der Rohrleitung zugleich Interferenzröhren [1] verbunden, so daß das Röhrensystem aus einer Hauptleitung und (im Extremfall) 20 Zweigleitungen bestand, welche senkrecht in das Hauptrohr mündeten und mit verschiebbaren Kolben versehen waren. Bei einer Einstellung des Kolbens in einem Seitenrohr auf $^1/_4$ Wellenlänge eines Tones wurde dieser Ton durch Interferenz gerade ausgelöscht.

Die Interferenzrohre wurden in Kombination mit zylindrischen Resonatoren auch zur Kontrolle über das Vorhandensein und die Stärke von Obertönen benutzt. Die oberhalb eines zu untersuchenden Teiltones liegenden Töne wurden durch das Interferenzrohr ausgelöscht. Aus dem Restklang wurde der fragliche Teilton mittels eines Resonators isoliert. Durch diese Methode war eine relative Stärkeschätzung der Obertöne möglich.

5. Versuchsanordnung

Die im Vorangegangenen geschilderten Einzelteile der Apparatur waren zu einer Apparaturanordnung zusammengesetzt, wie sie in Abb. 2 schematisch dargestellt ist. Das Schalleitungsrohr mit den Interferenzrohren ist nicht eingezeichnet.

Der in dem Tonsender T_1 erzeugte Wechselstrom wird an dem Potentiometer P_1a abgenommen und dem 3-NF-Verstärker V_1 zugeführt. Der verstärkte Strom geht in das Potentiometer P_1b, dem eine beliebige Spannung entnommen werden kann.

[1] Nach Grützner und Sauberschwarz (vgl. Stumpf, Sprachlaute, 1926, S. 36). Zu besonderem Dank bin ich Herrn Prof. Dr. E. R. Jaensch für die freundliche Überlassung von Interferenzröhren aus dem psychologischen Institut verpflichtet.

Das Potentiometer besteht zur gleichmäßigen Regulierung der Lautstärke aus Widerständen 1, 2 und 3 von den Größen 80, 1000 und 5000 Ohm. Die Lautstärke ist bis an die Grenze der Hörbarkeit kontinuierlich veränderlich. Die Tonhöhe ist einstellbar an dem Dreh- und Stöpselkondensator C_1a. Der auswechselbare Kondensator C_1b dient zur Drosselung der Obertöne. Bevor der Wechselstrom des bis hierher beschriebenen Sendekreises I von dem dreiteiligen Potentiometer P_1b aus über die Wippe W zum Lautsprecher L führt, passiert er die Primärspule des Transformators Tr. An der Sekundärspule liegt das Röhrenvoltmeter R mit dem Milliamperemeter M. Der Sendekreis I ist

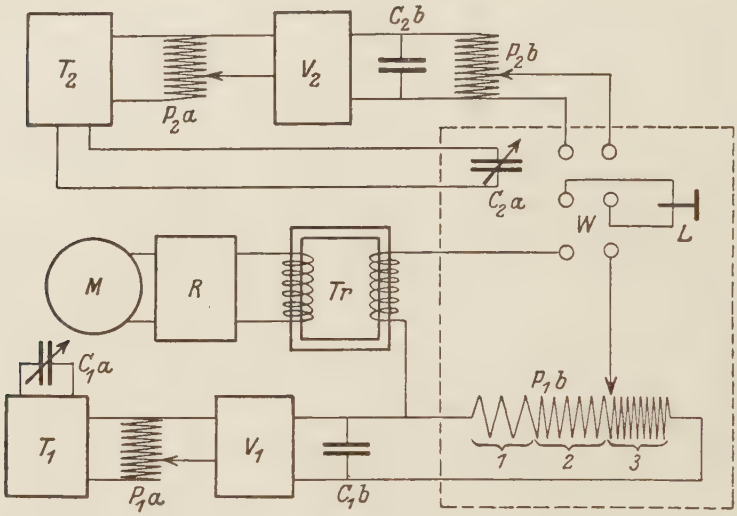

Abb. 2

nicht auf Tonhöhe sondern nur auf Lautstärke geeicht. Für die Erzeugung einer gewünschten Lautstärke ist bei bekannter Frequenz ein bestimmter in einer Tabelle notierter Ausschlag am Milliamperemeter notwendig.

Der Ton des Sendekreises II wird in dem Tonsender T_2 erzeugt. Er kann mittels des geeichten Dreh- und Stöpselkondensators C_2a genau auf gewünschte Höhe eingestellt werden. Der Sendestrom wird an dem Potentiometer P_2a abgenommen und in dem induktiv arbeitenden Zweifachverstärker V_2 verstärkt. Mittels des einfachen Potentiometers P_2b kann dem Lautsprecher über den anderen Eingang der Wippe W beliebige Spannung zugeführt werden. Zur Klangfarbenregulierung liegt

in Parallelschaltung der auswechselbare Kondensator C_2b. Sendekreis II ist nicht auf Lautstärke sondern nur auf Tonhöhe genau geeicht.

Die von dem gestrichelt gezeichneten Rechteck umschlossenen Teilapparate sind zur Bedienung durch die Vp. in Reichweite aufgestellt. Sendekreis I und II sind in solcher Entfernung voneinander getrennt, daß sie sich gegenseitig nicht beeinflussen.

Beide Tonsender werden auf gleiche Grundfrequenz (Kontrolle durch Schwebungen) und gleiche geringe Lautstärke (Kontrolle durchs Gehör) eingestellt. Die Tonhöhe ist aus der Tabelle der Zuordnung von Kapazität zu Frequenz des Tonsenders II ablesbar. Die zugehörige Kondensatorstellung des Senders I ist für alle Grundfrequenzen feststellbar. Die Lautstärke ist durch die Stärkeeichung von Tonsender I gegeben. Die Töne werden zum Vergleich stets zeitlich getrennt dargeboten. Die Wippe wird von der Vp. selbst bedient und schaltet momentan um.

Aufgabe der Vp. ist es, beide Töne der Empfindung nach auf gleiche Tonhöhe einzustellen. Die Tonhöhe des Senders I (Tonhöhe I) habe die Frequenz N. Die Tonhöhe II kann durch Kondensatoränderung (C_2a) kontinuierlich variiert und auf gleiche Empfindung wie Tonhöhe I gebracht werden. Dieser Versuch wird mehrfach wiederholt. Mit den sich ergebenden Differenzen der Einstellung besitzt man ein Maß für die Genauigkeit. Dann wird die Stärke des Tones II langsam gesteigert, während die des Tones I konstant bleibt. Für jede Stärkestufe erhält man aus mehreren Einstellungen auf gleiche Tonhöhe einen Mittelwert und gleichzeitig den Genauigkeitsgrad. Die erste Vergleichsreihe, bei welcher Lautstärkengleichheit der Sender I und II vorhanden ist, ergibt im Mittel für II die Tonhöhe N. Bei einer anderen Stärkestufe von I und der unveränderten von II wird am Sender II im Mittel die Schwingungszahl n_1 eingestellt. Bei der nächsten Stufe von I wird die Schwingungszahl n_2 eingestellt, dann n_3 usw. Aus diesen Werten ist die empfundene Tonhöhendifferenz gegeben als $dn_s = N - n_s$ ($s = 1, 2, 3, \ldots$).

Die Versuche wurden an insgesamt 29 Personen durchgeführt. Fünf der Vpn. waren wenig musikalisch geübt. Es zeigte sich bei ihren Einstellungen Unsicherheit. Qualitativ ergab sich jedoch dasselbe wie bei den 24 anderen Vpn. Es war oft ergötzlich zu beobachten, wie prompt immer wieder bei den verschiedensten Vpn. in derselben Weise reagiert wurde, obwohl

die Vpn. den Versuchen unbefangen gegenüberstanden. Die Übung spielt neben der Musikalität wesentlich eine Rolle. Es war z. B. ein musikalisch sehr begabter Klavierspieler, der nie ein Instrument gestimmt hatte, sehr unsicher im Einstellen, während Violinspieler viel sicherer einstellten. Darum wurden besonders Streichinstrumentspieler für unsere Versuche gewählt. Es stellten sich dankenswerterweise viele Herren des Collegium musicum instrumentale der hiesigen Universität für die Versuche zur Verfügung.

Das Versuchsmaterial ergibt im Auszuge ein Bild wie es im folgenden entwickelt und diskutiert sei. Es werden Mittelwerte und charakteristische Einzelversuchsreihen gezeigt.

Versuche und Ergebnisse

1. Hauptversuchsreihe

a) Verschiedenheit der Lautstärkedifferenz. Der Ausgangs- und Vergleichston hatte bei den ersten Versuchen eine Stärke von 2 Phon. Dabei zeigte die Kondensatorstellung von C_2a allgemein, daß der Ton I mit zunehmender Stärke kontinuierlich tiefer empfunden wird. Abb. 3 gibt ein Bild von der Änderung der Tonhöhenempfindung bei verschiedenen Vpn. (Über Genauigkeit der in Abb. 3 bis 7 mitgeteilten Meßwerte s. S. 67.)

Als Abszisseneinheit ist die Lautstärke in Phon gewählt. Auf der Ordinatenachse ist in Prozenten die empfundene Tonerniedrigung (d. h. die Differenz von empfundener Ausgangsfrequenz und jeweiliger Endempfindung bei veränderter Stärkedifferenz) in gleichen Abständen nach oben abgetragen. Die Versuche wurden mit der Frequenz $\mathfrak{n} = 435$ unter gleichen Bedingungen gemacht. Der Ton war nicht ganz rein, sondern deutlich beigemengt war die erste Oktave. Die Analyse ergab eine Stärke des Obertones von etwa $^1/_5$ des Grundtones.

Es fällt sofort die individuell verschiedene Wirkung der Stärkeänderung auf. Neben der qualitativen Verschiedenheit aber zeigen alle Kurven eindeutig mit zunehmender Verstärkung eine wachsende Tonerniedrigung. Bei mehr als 9 Phon verringert sie sich teilweise. Jede Kurve ist das Ergebnis einer Versuchsreihe an einer Vp. Der Übersicht halber sind die Vpn. numeriert, und die zugehörigen Nummern sind an jeder Kurve verzeichnet. Die Kurve der Vp. 5 zeigt einen Extremfall.

Versuche mit anderen Frequenzen ergeben ähnliche Abweichungen der Vpn. untereinander.

Bei diesen Versuchen sind die Lautstärkedifferenzen zwischen 0 und 3 Phon außer acht gelassen. Mehrmals war aber aufgefallen, daß bei geringer Intensitätsänderung wiederholt eine Tonerhöhung vorhanden zu sein schien. Das gab Veranlassung zu genaueren Versuchen im Bereich von 0 bis 5 Phon. Als Grund- und Vergleichsstärke des Senders II wurde $^1/_2$ Phon gewählt. Wird die Stärke des Senders I zwischen $^1/_2$ und 5 Phon verändert, so steigt die Tonhöhe mit zunehmender Lautstärke für viele Personen so lange, bis sie ihren Extremwert bei etwa 2 Phon erreicht hat. Dann sinkt sie wieder bis auf den Anfangswert, und darüber hinaus erst tritt Tonvertiefung ein.

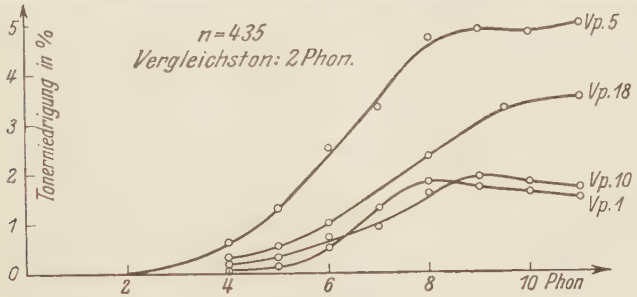

Abb. 3

Immerhin ist das Phänomen bei geringen Lautstärken nur sehr gering (im Höchstfall $^1/_{16}$ Ton). Bei manchen Vpn. tritt die geschilderte Tonerhöhung gar nicht auf, und bei wenigen setzt gleich von Beginn an eine geringe Erniedrigung ein. Die Ergebnisse sind bei diesen geringen Lautstärken nicht eindeutig und weisen auf stark psychologische Momente hin (s. S. 62 und 68).

b) Verschiedene Tonhöhenlagen. Bei Verwendung verschiedener Tonhöhen erhält man verschieden starke Wirkung der Lautstärkeänderung. Abb. 4 zeigt das Verhalten in verschiedenen Tonhöhenlagen. Sie stellt Versuchsreihen an ein und derselben Vp. dar.

Es sind Ergebnisse von Versuchen bei großer (3072 Hertz), mittlerer (768 Hertz) und kleiner (256 Hertz) Frequenz. Wir sehen eine Zunahme des Effektes mit sinkender Tonhöhe. — Die gestrichelten Kurven sind die zugehörigen Werte für einen

„Sekundärton", dessen Auftreten weiter unten (S. 63) geschildert wird. — Auch in Abb. 7 (S. 63) sind Versuchsreihen mit verschiedenen Frequenzen aufgezeichnet. Sie zeigen dieselbe Abhängigkeit von der Tonhöhenlage. Es wurden zwar verschiedene Vpn. gewählt, aber in jenem Falle ist die Differenz der Kurven keine Wirkung der Wahl der Vpn., sondern ausschließlich die der Verwendung verschiedener Tonhöhen.

Die Zunahme des Phänomens der Tonvertiefung mit sinkender Frequenz ist allgemeiner Natur und kommt durch die graphische Darstellung in Abb. 5 gut zum Ausdruck.

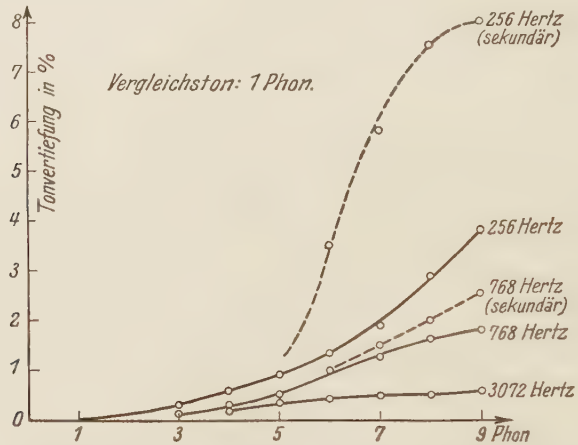

Abb. 4

Die Ordinatenwerte geben wie bisher die Vertiefung in Prozenten an, auf der Abszissenachse sind aber diesmal nicht die Lautstärken, sondern die Tonhöhenlagen, in denen die betreffenden Versuchsreihen durchgeführt wurden, aufgetragen. Alle Punkte der Kurven gelten für die Lautstärke des Grund- und Vergleichstones I von 1 Phon und des lauten Tones II von 9 Phon (die gestrichelte Kurve enthält die zugehörigen Werte für den Sekundärton). Der Verlauf der Kurven unterhalb 200 Hertz war nicht einwandfrei festzulegen, was bei der Schwierigkeit der Versuchsdurchführung begreiflich ist. Zudem muß man bedenken, daß bei etwa 100 Hertz die Grenze der Intervallenschätzung reiner Töne zu liegen scheint; F. A. Schulze (30) stellte fest, daß ihm „die Intervallschätzung des Differenztones gegen irgendeinen anderen Ton unmöglich wurde, sobald die Schwingungszahl des Differenztones unter etwa 100 v. d. herunterging". Die Intervall-

schätzung begann schon oberhalb 100 v. d. „sehr schwierig und anstrengend zu werden und wurde bei Schwingungszahlen unter 100 unmöglich".

Ähnliches Verhalten stellte sich hier bei Verwendung von „reinen" Primärtönen mit unterschiedlicher Lautstärke unterhalb 200 Hertz ein.

c) Wirkung der Obertöne. Durch die Beimengung von Obertönen erzielt man für unser Phänomen eine Wirkung, wie sie in Abb. 6 dargestellt ist. Die vermehrte Beimengung wurde erreicht durch Ausschalten der Interferenzrohre, durch Fortlassen der Parallelkondensatoren (P_1b u. P_2b) und durch Übersteuerung des Verstärkerrohres.

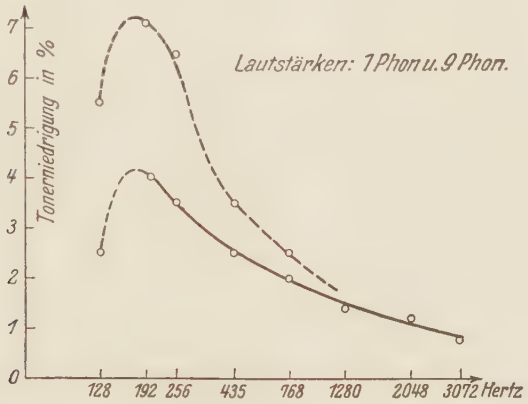

Abb. 5

Die gestrichelten Kurven der Abb. 6 stellen die Wirkung bei vermehrter Beimengung der Obertöne dar, die ausgezogenen Kurven sind erhalten bei Vorhandensein der Parallelkondensatoren und bei richtiger Steuerung des Verstärkerrohres. Alle Kurven sind bei der Frequenz von 768 Hertz aufgenommen. Bei anderen Frequenzen zeigen die Versuche ähnliches Verhalten.

Betrachtet man die gestrichelten Kurven im Vergleich zu den zugehörigen ausgezogenen Kurven, so erkennt man, daß sich die zwei Kurven einer jeden Vp. schneiden.

Die Obertöne wirken also derart, daß sie den Ton bei geringer Stärke herunterdrücken, während der Ton bei großen Lautstärken durch die Obertöne in die Höhe gezogen wird. Das heißt, bei Verringerung der Obertöne wird die Kurve gestreckt.

Der Einfluß der Obertöne ist also bei verschiedenen Lautstärken verschieden. Es wurden besondere Versuche zur Unter-

suchung dieser Erscheinung vorgenommen. Der Ton I wurde wie zuerst auf gleiche Höhe mit II gebracht. Beide Töne waren rein. Ihre Zuführung zu den Ohren geschah durch die Schlauchleitung. Mit einem dritten Tonsender wurde im Versuchsraum die Oktave erzeugt, welche stets beim Umlegen der Wippe von I nach II ausgeschaltet und beim Rücklegen eingeschaltet wurde. Sie klang also zusammen mit dem Ton I, welcher durch diese Hinzufügung eine Klangfärbenänderung erfuhr, während die Klangfarbe von II unverändert blieb. Die Lautstärke der beigemengten ersten bzw. zweiten Oktave war veränderlich.

Das Ergebnis dieser Untersuchung ist nicht eindeutig, die psychologischen Wirkungen hierbei sind zu mannigfaltig, aber im allgemeinen gilt: S e h r leise Töne gehen durch Beimengung von Obertönen meist in die Höhe, lautere werden allgemein heruntergedrückt, während sehr laute Töne wieder hochgezogen werden. Diese Art des Effektes ist wohl die häufigste und macht sich ja auch in unseren Kurven bemerkbar. Eine besondere Rolle spielt die Abstraktion. Die Versuche ergaben oft sehr labile Ergebnisse. Einmal wurde z. B. eine Erhöhung verursacht, das nächste Mal

Abb. 6

bei gleichen Versuchsverhältnissen vielleicht eine Vertiefung. Dabei konnte festgestellt werden, daß einmal der Gesamtklang als Einheit wirkte, der Oberton zog dabei den Grundton in die Höhe, das andere Mal wurde der Grundton vom Oberton abstrahiert, es trat dabei eine Kontrastwirkung auf, man empfand den Grundton tiefer. Es scheint also den Versuchen gemäß bei sehr leisen Tönen eine Abstraktion schwer möglich zu sein. Das ist verständlich, zumal die Höhe sehr leiser Töne für die Empfindung leicht variabel ist. Bei lauteren Tönen drängt sich eine Abstraktion des Grundtones von den Obertönen leichter auf. Natürlich ist auch die Änderung der Höhenempfindung der Obertöne durch ihre Lautstärkeänderung von Einfluß, denn unser Phänomem tritt sowohl beim Grundton als auch beim Oberton auf.

d) Sekundärton. Neben den bisher geschilderten Ergebnissen trat noch eine eigentümliche sekundäre Klangerscheinung auf. Es wurde bei Tönen von 768 Hertz an und tiefer bei mittleren und großen Lautstärken gar nicht mehr nur ein Ton empfunden, sondern mit der Stärkezunahme tauchte immer deutlicher neben dem eigentlichen Ton, auf welchen eingestellt wurde, ein tieferer zweiter Ton auf. Wir nennen ihn der Kürze halber den „Sekundärton". Er wurde ebenfalls mit zunehmender Stärke des Klanges weiter vertieft. Viele Vpn. stellten diese Erscheinung, ohne darauf aufmerksam gemacht zu werden, von sich aus fest; die anderen Vpn. hörten den Ton, wenn man sie auf ihn aufmerksam machte. Zur Charakteristik des Sekundärtones dient

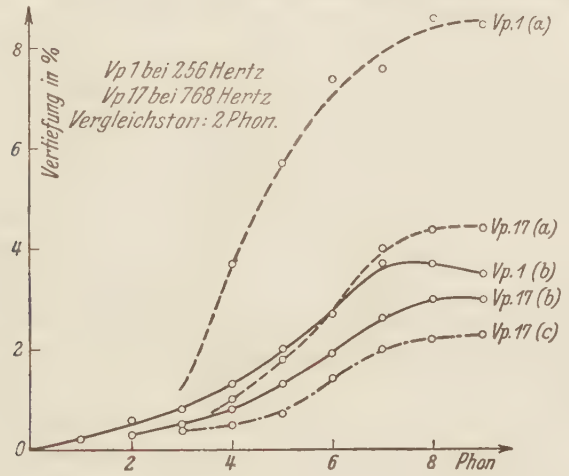

Abb. 7

eine Äußerung der Vp. 17: „Der tiefe Ton ist wohlklingender und zarter als der andere, auf den man einzustellen gewillt ist. Er scheint im Raume zu schwingen, während der andere direkt vom Lautsprecher herzukommen scheint". Das „Wohlklingen" und „im Raume schwingen" bei der Empfindung des Sekundärtones erinnert an ähnliche für die Kombinationstöne typische Erscheinungen.

Auffallend ist auch die Analogie zu den Kombinationstönen in bezug auf Deutlichkeit der Wahrnehmung. Hört man zum erstenmal Kombinationstöne, so bedarf es gewisser Aufmerksamkeit, um wirklich eine Empfindung von ihnen zu haben; die Primärtöne drängen sich zu deutlich auf. Ist man geübter, so ist fast das Umgekehrte der Fall. Ähnlich ist es bei unserem

Sekundärton. Meist dauert es aber beim Einschalten des lauten Tones erst eine Weile bis der Sekundärton empfunden wird, er schält sich langsam zu voller Deutlichkeit aus dem Klangganzen heraus, dann aber drängt er sich unabwendbar auf.

Abb. 7 veranschaulicht die Höhenänderung des Sekundärtones bei Lautstärkezunahme des objektiven Tones. Sie zeigt zwei Versuchsreihen, eine von Vp. 1 mit der Frequenz von 256 Hertz und eine andere von Vp. 17 mit der Frequenz 768. Die Kurven b zeigen den Verlauf bei Einstellung auf die Empfindung des Primärtones, die Punkte der Kurven a sind die zugehörigen Einstellungen auf den Sekundärton. (Vergleiche ebenfalls die gestrichelten Kurven für den Sekundärton von Abb. 4 und 5 (S. 60/61).) Die Bedeutung der Kurve 7 wird weiter unten (S. 65) geschildert.

2. Genauigkeit der Meßmethode

a) Ungenauigkeiten. Die Genauigkeit der Messungen wurde durch verschiedene Erscheinungen beeinträchtigt. Zunächst war eine Inkonstanz der Tonhöhenempfindung gleich nach Einsatz des Tones vorhanden, die bis auf $^1/_8$ Ton geschätzt wurde. Im ersten Augenblick war der dargebotene Ton höher als nach wenigen Sekunden. 18 Vpn. teilten diese Wahrnehmung unaufgefordert mit. Ging man vom lauten Ton durch Umlegung der Wippe zum leisen über, so vertiefte sich der leise Ton während des ersten Augenblickes nach dem Einsatz. Die Zeitdauer vom Einsatz bis zur Konstanz der Höhe wurde bei leisen Tönen auf 1—3 Sek. geschätzt. Besonders auffallend ist aber das Tieferwerden nach dem Einschalten bei lauten Tönen, bei denen aber die Zeitdauer der Inkonstanz geringer zu sein scheint. Sie wird auf $^1/_4$—1 Sek. geschätzt. Bei manchen Vpn. hielt jedoch die Inkonstanz der lauten Töne erheblich länger an (z. B. Vp. 5), der Ton schien fast dauernd tiefer zu werden.

Die Inkonstanz der Tonhöhe nach Einsatz liegt, wie durch Versuche mittels Schließen und Öffnen der Schlauchleitung nachgewiesen wurde, nicht an der Apparatur, sondern scheint physiologisch-psychologisch bedingt. Objektiv blieb die Tonhöhe vom ersten Augenblick an konstant.

Wurde der Vp. der laute Ton nur einen Moment dargeboten, so konnte also unser Phänomen der Tonvertiefung nicht in der Stärke auftreten, als wenn die Vp. den lauten Ton zunächst länger fixiert und dann erst umschaltet. Die Kurve c der Vp. 17 in Abb. 7

ist nun derart aufgenommen, daß der laute Ton nur ganz kurz dargeboten wurde, während die Kurve b der Vp. 17 bei Versuchen mit längerem Fixieren des lauten Tones entstand. Der Verlauf der Kurve c weicht sichtlich von dem der Kurve b ab, während wir qualitativ allerdings dasselbe Bild haben. Bei allen anderen in vorliegenden Kurven und Tabellen verwerteten Versuchen wurde den Vpn. stets die Anweisung gegeben, die Töne erst eine Zeit lang zu fixieren und dann erst umzuschalten.

Da bei lauten Tönen die Höhe nicht leicht zu schätzen ist, klammern sich die Vpn. zur Orientierung an alles was sonst irgendwie einen Aufschluß über die Tonhöhe geben kann. Darum mußte den Vpn. jeder unerwünschte Anhaltspunkt genommen werden. Besonders der Nachhall wirkte für die Versuche in dieser Weise störend. Der Nachhall ist stets von geringerer Lautstärke als der eigentliche Ton, er ist also für die Empfindung höher als dieser und stört somit. Darum wurde als Versuchsraum eine akustische Zelle mit nichtschallreflektierenden Wänden hergestellt. Sie war 10 m^3 groß und ihre Wände sowie Fußboden und Decke waren mit Stoff bzw. schweren Decken bekleidet.

Allgemein wird die Einstellung auf empfundene Tonhöhe so vollzogen, daß man um eine gewisse Stelle der Kondensatorskala herumpendelt, welche man als die etwa richtige Einstellung erkennt. Bei nicht zu lauten Tönen erhält man schnell große Sicherheit im Einstellen.

Jedoch ist bei Benutzung sehr lauter Töne eine Labilität der Einstellung auf diese gewisse Stelle zu bemerken. Die Einstellung will nie recht stimmen. Nähert man sich beispielsweise von tiefen Tönen her dieser Mittelstellung, so hat man das Empfinden, immer höher stellen zu müssen, bis man schließlich merkt, man hat zu hoch gestellt. Von der Seite höherer Töne herkommend überschreitet man ebenfalls erst die Mittellage. Man kann beim Einstellen des leisen Tones auf den sehr lauten kaum mit Sicherheit sagen „jetzt stimmt es“, sondern man wagt nur zu behaupten „so stimmt es am besten“. Jedoch kann man durch Übung auch hier einige Sicherheit im Einstellen erlangen.

Ferner gilt für unsere Versuche nicht mehr die Unterschiedsempfindlichkeit der Tonhöhe wie sie z. B. durch Versuche von Fletcher und Knudsen (27 u. 31) festgestellt wurde; denn bei ihnen wurden nur Töne gleicher Lautstärke mitein-

ander verglichen, während wir es bei unseren Versuchen mit Tönen verschiedener Stärke zu tun haben. Schon beim Vergleich von Tönen mit wenig verschiedener Stärke zeigt sich eine bedeutende Änderung der Unterschiedsempfindlichkeit. Die Unterschiedsempfindlichkeit nimmt bis zu den größten Stärkedifferenzen immer mehr ab.

b) Genauigkeit der Meßwerte. Trotz der verschiedenen geschilderten Schwierigkeiten ist für die Versuche genügende Genauigkeit garantiert. Bei geübten Vpn. stimmen selbst an verschiedenen Tagen vorgenommene Versuche gut überein. Zahlentafel 2 zeigt das Ergebnis solcher Messungen. Die Versuche wurden durchgeführt bei einer Frequenz von 768 Hertz. Der Vergleichston des Senders II besaß die konstante Stärke $1^1/_2$ Phon. Der Ton des Senders I nahm die in der Tafel genannten Werte zwischen $1^1/_2$ und 9 Phon an. Die empfundene Tonhöhendifferenz ist in Prozenten angegeben. Die positiven Werte bedeuten Vertiefung, die negativen bedeuten Erhöhung des lautstarken Tones.

Zahlentafel 2

(Für 768 Hertz)

Datum	$1^1/_2$	$2^1/_2$	$4^1/_2$	6	8	9 Phon
4. 7. 28	0	0	+0,9	+1,6	+1,7	+1,7
6. 7.	0	−0,2	+0,9	+1,3	+1,6	+1,6
7. 7.	0	−0,1	+0,9	+1,3	+1,7	+1,8
8. 7.	0	−0,1	+0,9	+1.5	+1,6	—
9. 7.	0	0	+0,9	+1,5	+1,9	+1,8
10. 7.	0	0	+0,8	+1,5	+1,9	—
14. 8. bis 21. 8. Mittelwerte	0	0	+0,5	+1,0	+1,3	+1,5

Jede Zahl der ersten 6 Zeilen der Zahlentafel 2 ist das Mittel von 6 Versuchen. Die Konstanz der Empfindung für den Zeitraum einer Woche ist durch diese Versuche erwiesen. Die letzte Reihe zeigt im Mittel die Einstellung bei gleichen Bedingungen im Verlaufe einer Woche sechs Wochen später. Eine deutliche Änderung letzterer Resultate gegenüber den früheren ist zu merken. In der Zwischenzeit hatte die Vp. sehr viel mit dem Ton der Frequenz 768 experimentiert und sich dabei eine noch größere Übung im Höhenvergleich verschieden starker Töne an-

geeignet. Nach abermals einigen Wochen blieb die Einstellung aber dieselbe wie die der letzten Zeile von Zahlentafel 2. Eine weitere Änderung nach weiterer Übung zeigte sich nicht.

Über die Genauigkeit unserer Meßmethode steht fest: 1. In mittlerer Höhenlage ist der Vergleich von Tonhöhen mit größter Genauigkeit möglich; nach hohen und tiefen Tonlagen hin nimmt die Genauigkeit ab. 2. Mit wachsender Tonstärkendifferenz nimmt die Genauigkeit des Tonhöhenvergleiches gleichfalls ab.

Bei tiefen Tönen aber kommt der Versuchsgenauigkeit zugute, daß mit der Tonstärkendifferenz die empfundene Tonhöhendifferenz erheblich zunimmt. Wenn also die Unterschiedsempfindlichkeit sich mit der Stärkedifferenz absolut genommen sehr stark vermindert, so wirkt sich diese Ungenauigkeit in unserem Falle nicht so sehr aus, wenn wir sie relativ zur empfundenen Tonhöhendifferenz betrachten. In Abb. 3 (S. 58) z. B. hat die Kurve der Vp. 5 für $4^1/_2$ Phon den Ordinatenwert von $\sim 1\%$ Schwingungen. An dieser Stelle sei die Unterschiedsempfindlichkeit etwa $0{,}2\%$, d. h., der Ordinatenwert 1 kann variieren zwischen 0,9 und $1{,}1\%$ Schwingungen. Das ist eine Ungenauigkeit des Ordinatenwertes von 20%. Bei 9 Phon ist der Ordinatenwert 9%; lassen wir auch hier einen Fehler von 20% zu, so darf der Wert 5 sich verändern zwischen 4,5 und 5,5. Um in diesen Grenzen zu bleiben ist beim Vergleich dieses 9 Phon starken Tones mit dem Grundton nur eine Unterschiedsempfindlichkeit von 1% Schwingungen notwendig. In Wirklichkeit ist die Empfindlichkeit aber größer als 0,2 bzw. 1% Schwingungen, so daß im Extremfall bei 435 Hertz nur ein Fehler der Ordinatenwerte bis zu 15% vorkommt.

Anders verhält es sich bei Versuchen mit Tönen sehr hoher Schwingungszahl; denn bei Verwendung hoher Töne (2000 Hertz und mehr) mit großen Lautstärken fällt das für die prozentuale Genauigkeit der Ordinatenwerte so günstige Auftreten der sehr großen Höhenempfindungsdifferenz fort. Die Erscheinung der Tonerniedrigung haben wir für Töne oberhalb 3072 (vgl. Abb. 5) in so geringem Maße — bei 9 Phon nur etwa $0{,}6\%$ Schwingungen —, daß eine bei tiefen Tönen erlaubte Unterschiedsempfindlichkeit von nicht ganz 1% Schwingungen die ganze Wirkung der Lautstärkenänderung bei den hohen Tönen verdeckt. Darum waren die Untersuchungen mit Frequenzen ober halb 3072 Hertz ergebnislos.

c) Bewährung der Meßmethode. Ein Vergleich zwischen den Ergebnissen der geschilderten Messungen und anderen auf andere Weise erzielten Resultaten gibt Aufschluß über die Bewährung unserer Meßmethode.

Verfolgen wir eine Stimmgabel im Verlaufe ihres Abklingens nach kräftigem Anschlagen, so wird von den Vpn. qualitativ festgestellt, daß die Tonhöhe zunächst kontinuierlich in die Höhe geht, solange bis sie schon sehr leise klingt. Dieses unser Phänomen ist an Stimmgabeln mit Resonanzkasten bei mittlerer und kleiner Frequenz sehr leicht zu demonstrieren. Bei weiterem Abklingen der Gabel aber hat man die Empfindung, daß die Tonhöhe sinkt. Beide Erscheinungen werden ja durch unsere quantitativen Versuche bestätigt. Das Sinken in der Höhenempfindung kurz vor dem Ausklingen ist psychologisch erklärbar. C. Stumpf, dem beim Verklingen einer Gabel zunächst die Vertiefung und nicht die Erhöhung auffiel, schildert diese psychologische Wirkung in seiner „Tonpsychologie“ (I, S. 239). Es wirkt die Vorstellung mit, daß zur Erzeugung tiefer Töne eine geringere Kraftanstrengung nötig ist als zur Erzeugung höherer Töne (Singen, Pfeifen, Flöten). Die Wirkung dieser Vorstellung kontrollierten viele unserer Vpn. an sich selbst. Zum Beispiel bei der Aufforderung „höher singen“, wird vielfach gleichzeitig lauter gesungen, beim lauten Sprechen (Rufen) wird gleichzeitig höher gesprochen. Das „Absterben“ eines Tones oder Geräusches im Leben (Sirene, Kindergeschrei, Stöhnen usw.) ist im allgemeinen verbunden mit einem Tieferwerden. Es bestehen also die Verbindungen: laut — hoch, leise — tief. Man siehe auch die interessante Erörterung von C. Stumpf, (Tonpsychologie, I, S. 193 u. 198/199) über die vielfache sprachliche Identifizierung von laut und hoch, leise und tief.

Zwar findet man auch objektiv eine Änderung der Frequenz von Stimmgabeln durch Amplitudenänderung (32), aber die objektive Schwingungszahländerung ist so gering, daß sie bei obigen Versuchen für die Empfindung nicht in Frage kommt. Mit den elektrisch erzeugten Tönen kann die geschilderte Wirkung der Vorstellung[1] ebenfalls gezeigt werden. Selbst die Willkür ist, wenn die Tonhöhe nicht zu eindrucksvoll und aufdringlich ist (besonders bei leisen Tönen), von Einfluß.

[1] Über Verschmelzung von Vorstellung und Wahrnehmung vgl. E. R. Jaensch, Eidetik. Leipzig (46).

Die bei unseren Versuchen benutzte Meßmethode drückt die erwähnten psychologischen Einflüsse auf ein Minimum herab. Dadurch, daß die Vp. gezwungen ist, die empfundene Tonhöhe auch wirklich an dem Tonsender II einzustellen, macht sie sich im Wesentlichen frei von Vorstellungen. Bei Vorhandensein von Obertönen wird die Wirkung der Klangfarbe allerdings, wie Abb. 6 zeigt, nicht restlos ausgeschaltet.

Besonders wertvoll ist es, daß die Vp. keine Intervalle zu schätzen braucht, sondern nur auf gleiche Tonhöhe einzustellen hat; denn Höhenintervalle werden meist größer geschätzt als sie in Wirklichkeit sind. Beim Vergleich zweier Töne der Schwingungszahl 128 sagte Vp. 26: „Der laute Ton ist ja einen Ganzton tiefer als der leise." Sobald sie aber einstellte, merkte sie den Fehler ihrer Intervallschätzung. Es wurde eingestellt auf eine Empfindungsdifferenz von etwa $^1/_2$ Ton. Besonders ungenau wird die Intervallschätzung bei kontinuierlicher Lautstärkeänderung des Tones wie es bei dem Ausklingen der Stimmgabel der Fall ist. Dadurch, daß die Aufmerksamkeit mit der Stärkeverminderung und somit ebenfalls mit der Tonhöhenänderung wandert, tritt die Empfindung auf, daß das Intervall sehr groß ist. Unsere Methode der Einstellung auf gleiche Tonhöne bewährt sich demgegenüber gut.

3. Nebenuntersuchungen

a) Verhalten der Kombinationstöne. Nachdem die Vertiefung der Tonhöhenempfindung durch die Lautstärkevermehrung durch unsere Versuche neu bestätigt ist, erhebt sich die Frage: sind bei der Bildung subjektiver Kombinationstöne eigentlich die objektiven oder die empfundenen Schwingungszahlen maßgebend?

Die Schwingungszahl der Kombinationstöne läßt sich darstellen in der Form $ap \pm bp$, wenn p und q die Schwingungszahlen der Grundtöne und a und b beliebige ganze Zahlen sind. Wir betrachten den Differenzton von der Schwingungszahl $p - q$, wobei $p > q$ ist. Wenn $p = 900$ und $q = 700$ gegeben sind, so ist $p - q = 200$. Bei Lautstärkeänderung, so sagt unser Intensitätseffekt, ändert sich die empfundene Schwingungszahl. Bei einer Empfindungsänderung des Tones $p = 900$ um (wie es unseren Versuchen nach sehr wohl möglich ist) etwa $^1/_4$ Ton (3% Schwin-

gungen) erhält man für den verstärkten Ton die Schwingungszahl $p_{st} = 873$. Es entsteht der Rechnung entsprechend aus den beiden Tönen mit den empfundenen Frequenzen p_{st} und q (letztere unverändert) ein Differenzton von der Frequenz 873—700 = 173 Hertz. Die Voraussetzung dabei ist, daß die empfundenen Differenzen kombinieren. Wir bekämen also bei Stärkeänderung eines Primärtones eine Tonhöhenänderung des Differenztones von 13 % Schwingungen, was mehr als einem Ganzton entspricht. Diese große Änderung von $p - q$ auf $p_{st} - q$ müßte also auffallen, wenn ein Einfluß in dieser Art bestände. Durch geeignete Zahlenkombination für Differenztöne höherer Ordnung können ähnliche Beispiele gegeben werden.

Es wurden Versuche über das Verhalten der Differenztöne bei Stärkeänderung eines Primärtones angestellt. Zur Erzeugung des Differenztones dienten der Tonsender I und ein dritter Tonsender III. Mittels der Wippe wurden beide Töne I und III gleichzeitig eingeschaltet. Mit den Primärtönen zusammen war auch der Differenzton hörbar. Natürlich wurde der Differenzton nicht objektiv erzeugt — die Primärtöne entstanden getrennt je in einem besonderen Telephon —, sondern sie traten erst subjektiv im Ohre auf. Durch Umkippen der Wippe wurden I und III gleichzeitig ausgeschaltet und der Tonsender II in Betrieb gesetzt. Der Sender II wurde auf dieselbe Tonhöhe wie die des erzeugten Differenztones eingestellt. Dann wurde die Lautstärke von I geändert und wiederum die empfundene Tonhöhe des Differenztones durch Einstellung am Sender II festgestellt. Die dabei auftretende Differenz zwischen erster und zweiter Einstellung ergab die gesuchte Höhenänderung.[1] Alle Versuchsdurchführungen mit dem Differenzton erster und zweiter Ordnung ergaben, daß die theoretisch hergeleitete enorme Tonhöhenänderungen um einen ganzen Ton und mehr durchaus nicht auftritt. D. h. es sind nicht die empfundenen, sondern die objektiven Schwingungszahlen für die Bildung der Kombinationstöne maßgebend.

Wenn sich auch nicht die enorme Vertiefung des Differenz-

[1] Um möglichst große Stärkedifferenzunterschiede der Primärtöne zu erhalten, wurde verschiedentlich bei der ersten Einstellung Ton III laut und Ton I leise und bei der zweiten Einstellung Ton I laut und Ton III leise dargeboten. Der Differenzton behielt dabei etwa dieselbe Stärke.

tones durch die Stärkeänderung eines Primärtones zeigte, so müßte wenigstens das Phänomen der Tonvertiefung an den Differenztönen in der Art zu erkennen sein, wie es bei objektiv erzeugten Tönen vorhanden ist. Es sind Versuche darüber an 5 Vpn. durchgeführt. Sie lassen aber keine Gesetzmäßigkeit erkennen; denn einerseits können wir die Stärke der Differenztöne höchstens bis 5 Phon steigern, zweitens haben wir kein (absolutes) Maß für die Lautstärke der Differenztöne, denn sie können unter gleichen Umständen bei verschiedenen Vpn. sehr wohl verschieden sein, da die Differenztöne subjektiv im Ohr entstehen; drittens sind neben den Differenztönen die beiden Primärtöne in überaus großer Stärke vorhanden, so daß eine genauere Kontrolle über den Vorgang der Erscheinung schwer möglich ist.

b) Monotisches und diotisches Hören. Alle bisher besprochenen Versuche wurden bei diotischem (zweiohrigem) Hören vorgenommen. Ein Grund dafür war, daß das monotische (einohrige) Hören den Vpn. ungewohnt ist, und daß andererseits das nichtgebrauchte Ohr niemals ganz dem Einfluß des Tones im anderen Ohre entzogen werden kann. Dadurch treten Störungen auf. Die Versuche bei monotischem Hören im Vergleich zu denen bei diotischem liefern aber sehr interessante Ergebnisse.

Zunächst kann bestätigt werden, daß allgemein auf beiden Ohren in verschiedener Höhe gehört wird. Beide Ohren zusammen empfinden eine mittlere Höhe. Auch ist meist die empfundene Klangfarbe auf beiden Ohren und ebenfalls die Unterschiedsempfindlichkeit beider Ohren verschieden. Z. B. differieren bei der Schwingungszahl 435 mit konstanter Lautstärke die Einstellungen am Kondensator beim Hören mit dem rechten Ohr im Maximum um 20°, beim linken um 23° und mit beiden Ohren zusammen um nur 4°.

Untersuchen wir den in dieser Arbeit behandelten Intensitätseffekt beim monotischen Hören, so tritt die Tonvertiefung in geringerem Maße auf als bei diotischem Hören. Diese Verringerung der Erscheinung erklärt sich dadurch, daß das an sich unbeteiligte Ohr durch die Knochenleitung ebenfalls erregt wird. Die Lautstärke ist in diesem eigentlich unbeteiligtem Ohre nur sehr gering, darum ist in ihm alleine kaum eine empfundene Tonerniedrigung vorhanden. Die getrennt empfundenen Ton-

höhen beider Ohren vereinigen sich zu einer mittleren Tonhöhenempfindung. Die folgenden Versuche erlauben einen Einblick in dieses Verhalten.

Vp. 15 hört mit dem linken Ohre höher als mit dem rechten und empfindet bei diotischem Hören eine mittlere Höhe. Dem linken Ohre der Vp. 15 wurde ein Ton konstanter Stärke sm gereicht. Dem rechten Ohre wurde gleichzeitig derselbe Ton erst unhörbar, dann leise, und danach langsam immer stärker zugeführt, bis er die gleiche Stärke sm wie der Ton des linken Ohres besaß. Weiterhin ließ man nun die Lautstärke im rechten Ohre konstant, und der Ton im linken Ohre wurde langsam bis zur Unhörbarkeit geschwächt. Die Tonhöhe allein mit dem linken

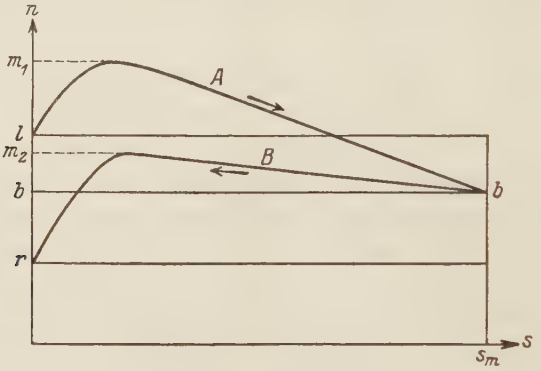

Abb. 8

Ohre empfunden sei l, mit dem rechten allein empfunden sei r und mit beiden zusammen empfunden sei b. Für Vp. 15 war l größer als r.

Abb. 8 zeigt schematisch den Verlauf der empfundenen Tonhöhe n in Abhängigkeit von der Stärke s der Zuführung des Tones ins rechte (Kurve A) bzw. ins linke Ohr (Kurve B) bei konstanter Lautstärke s_m im anderen Ohre. Die Abszissenwerte geben die Stärke s an, die Ordinate zeigt die zugehörigen empfundenen Tonhöhen n.

Wird neben dem im linken Ohr empfundenen Tone konstanter Stärke der Ton im rechten Ohr langsam hörbar, so steigt die empfundene Höhe von l ab schnell auf einen Extremwert m_1. Bei weiter vermehrter Lautstärke im rechten Ohre sinkt sie unter den Wert l, bis bei gleicher Lautstärke s_m in beiden Ohren der Wert b erreicht wird (vgl. Kurve A). Läßt man nun die Stärke

im rechten Ohr konstant und vermindert sie im linken (die s-Achse ändert damit ihre Bedeutung), so steigt die empfundene Tonhöhe wieder langsam bis zu einem anderen Extremwert m_2 und sinkt beim Verschwinden des Tones im linken Ohre über den Wert b hinaus bis zum Werte r (vgl. Kurve B).

Durch diese Versuche ergibt sich also zwangsläufig die oben gegebene Erklärung für das qualitativ geänderte Verhalten bei monotischem Hören.

Diskussion der Ergebnisse

1. Vergleich mit früheren Ergebnissen

Die in der Literatur vorhandenen Angaben über den Intensitätseffekt sind nicht eindeutig. Gerade die Nichtbeachtung der psychologischen Momente bei Intervallschätzungen und bei Vorhandensein von Obertönen bringen Unklarheiten in die an sich eindeutige Erscheinung. Es steht die Erscheinung einer Tonerhöhung durch Verstärkung (wie sie vor allem von C. Stumpf behandelt ist) unvermittelt neben der Tatsache der viel häufiger auftretenden Tonvertiefung. Unsere Versuche zeigen, daß tatsächlich beide Arten der Erscheinung möglich sind.

Die qualitative Verschiedenheit hängt ab von der Wahl der Tonstärke. Bei leisen Tönen zeigte sich häufig eine Tonerhöhung, welche als psychologisch verursacht anzusehen ist (s. S. 68). Auf solche verhältnismäßig schwache Töne bezieht sich vermutlich die Mehrzahl der von C. Stumpf (Tonps. I, S. 236ff.) mitgeteilten Beobachtungen. Bei mittlerer und großer Lautstärke ist aber kein Höherempfinden vorhanden, sondern es tritt stets Tonvertiefung auf. Nur bei ganz lauten Tönen nimmt für manche Versuche die Tonvertiefung wieder etwas ab. Die bisher verschieden ausgefallenen Resultate brauchen also nicht als sich widersprechend bezeichnet zu werden, sondern alle Beobachtungsergebnisse lassen sich ungezwungen durch die Versuchsergebnisse dieser Arbeit erklären.

Quantitativ kann die Erscheinung in verschiedener Stärke auftreten. Die Auffälligkeit der Erscheinung hängt ab von der Stärkedifferenz und von der Wahl der Tonhöhe. Je größer die Stärkedifferenz ist, um so stärker ist im allgemeinen der Effekt, und bei tiefen Tönen ist die Wirkung größer als bei hohen. Gleichfalls können Unterschiede im Ergebnis entstehen durch Verwendung

verschiedener Meßmethoden. Intervallschätzung verstärkt die Wirkung gegenüber Einstellung auf gleiche Tonhöhe. Darum ist es nicht verwunderlich, daß R. Ewald mit der Methode des Einstellens auf gleiche Höhe bei 100 Hertz nur eine Differenz von $^1/_8$ Ton fand, während Burton durch Intervallschätzung bei 128 Hertz als Ergebnis eine kleine Terz erhielt. Dabei ist ganz abgesehen von den Tonstärken, welche bei den Versuchen verwandt wurden.

Wir fanden bei verschiedenen Vpn. quantitativ sehr verschiedene Ergebnisse. Die Tonvertiefung kann bis um 100% verschieden ausfallen. Das stimmt mit den Feststellungen von Burton und Ewald überein. Beide erwähnen, daß ihre Ergebnisse an verschiedenen Personen quantitativ verschieden ausfielen.

Der Einfluß von Obertönen im Zusammenhang mit dem Intensitätseffekt ist bereits von E. Mach erkannt worden. Mach hat festgestellt, daß die Tonerhöhung beim Verklingen reiner Töne nicht so stark ist wie bei Klängen. Das stimmt mit den Ergebnissen dieser Arbeit überein, wenn wir annehmen, daß Mach nicht mit den stärksten Intensitäten gearbeitet hat. Unsere Kurven von Abb. 6 (S. 62) zeigen ja tatsächlich, daß unterhalb 6 Phon die Vertiefung bei obertonreichen Klängen erheblicher ist als bei reinen Tönen. Erst bei größerer Lautstärke wird die Vertiefung (durch Verunreinigung der Töne) verringert.

Über die Wirkung der Lautstärkeveränderung in verschiedenen Tonhöhenlagen war bisher nur wenig bekannt. Burton erhält bei Versuchen an Stimmgabeln mit 256 Hertz eine Differenz von $^1/_2$ Ton und mit 128 Hertz einen Unterschied von einem Ganzton bis zur kleinen Terz. Broca hingegen erhält bei allen Stimmgabeln von ut_2 bis ut_5 einen Wert von $^1/_5$ Ton. Interessant ist noch die Bemerkung von Stumpf (Tonpsychologie Bd 1 S. 240), daß die Täuschung der Tonerhöhung durch die Lautverstärkung nur bei hohen Tönen auftritt, vielleicht wirkt hier neben dem von Stumpf angegebenen verschiedenen Einfluß der Obertöne die Tatsache mit, daß bei den tiefen Tönen die psychologischen Momente (denn durch solche wird die Tonerhöhung hervorgerufen) nicht mehr imstande sind, die viel stärkere physiologische Wirkung der Tonerniedrigung (vgl. Abb. 5 S. 61) zu überbieten

2. Entstehung der Tonerniedrigung

Die von den objektiv-physikalischen Ursachen und von den psychologischen Momenten befreite Restwirkung der Tonhöhenänderung muß man, wie auch Ewald es tut, als physiologisch im Ohrinneren verursacht ansehen, wenn man nicht ganz auf eine Hörtheorie der peripheren Organe verzichten will. Es steht nur noch die Frage aus: Wo und in welcher Weise entsteht die Tonerniedrigung im Ohr?

Als Entstehungs*ort* sehen wir mit C. Stumpf und R. Ewald die *Basilarmembran* an. Diese Annahme scheint am besten der ganzen Sachlage zu entsprechen. Auch in bezug auf die Bildung der Kombinationstöne und auf die Vereinigung der in beiden Ohren getrennt entstehenden Nervenreizung zu einer Gesamtempfindung ordnet sich obige Annahme der allgemeinen Auffassung über Klangaufnahme durch das Ohr ein. Aus unseren Versuchen über Differenztöne (S. 70) ergibt sich, daß für die Kombinationstöne nicht die empfundenen, sondern die objektiven Schwingungszahlen maßgebend sind. Das heißt, die Kombinationstöne haben sich im Ohre schon *vor* der Entstehung der Tonerniedrigung aus den Primärtönen gebildet. Nach Helmholtz entstehen sie ja durch Unsymmetrie des Schalleitungsapparates: Trommelfeld-Gehörknöchelchen — ovales Fenster. Erst später kommt die Tonerniedrigung zustande, und zwar in beiden Ohren getrennt, und nach der Tonhöhenänderung erst vereinigen sich, was unsere Versuche über monotisches und diotisches Hören ja ergeben, die getrennt entstandenen Veränderungen zu einer einzigen Empfindung. Die Vereinigung ist zentraler Natur, die Entstehung der Kombinationstöne ist peripher. Zwischen beiden liegt die Entstehung des Intensitätseffektes. Die Basilarmembran liegt etwa an der Grenze Peripherie-Nervensystem, und kommt somit am ehesten als Entstehungsort der Höhenänderung in Frage.

Für die Erklärung der Entstehungs*weise* der Tonerniedrigung ist die Kenntnis der Beschaffenheit der Basilarmembran erforderlich. Schon Helmholtz nahm die Basilarmembran als bestehend aus einzelnen Resonatoren an. Nach seiner Resonanztheorie sind die sog. „Basilarfasern“ die Resonatoren. Diese Fasern werden in ihrer Wirkungsweise mit gespannten an beiden Enden befestigten Saiten verglichen. Dieser Vergleich hat seine Berechtigung darin, daß die Basilarmembran hauptsächlich in ihrer Querrichtung gespannt ist. Sie zeigt „Querfaserstruktur“. Natürlich sind die

Basilarfasern keineswegs ideale Saiten — sie werden nur zur Ermöglichung der Rechnung als ideal angenommen —, sondern an sich ist der ganze Schallaufnahmevorgang des Ohres äußerst kompliziert. Bei der Bezeichnung „Basilarfaser" ist außer der wirklichen Faser der Membran mit einbegriffen das Cortische Organ bestehend aus verschieden gespannten Bögen, den Nervenzuleitungen und den Sinneshaaren mitsamt ihren Beziehungen zur Tektoriamembran. Ebenso ist hinzuzurechnen die Masse der in Schwingungen befindlichen Flüssigkeit des Ohrinneren, und zwar ist dabei gedacht an einen „Flüssigkeitsfaden" (33), der vom ovalen Fenster bis zur betreffenden Faser und von dort zum runden Fenster reicht.

Ewald nimmt an, wenn er die Resonanztheorie zugrunde legt, daß mit Vergrößerung der Amplitude der Resonatoren der Basilarmembran „ihre Schwingungen etwas verlangsamt würden". Dann könnte natürlich nur eine höher gestimmte Faser für die richtige eintreten, und der laute Ton müßte höher klingen. Ewald denkt bei der Verlangsamung der Schwingungen durch die Amplitudenvergrößerung anscheinend an ein Pendel, bei welchem die Schwingungsdauer mit der Amplitude wächst. Er scheint also stillschweigend anzunehmen, daß sich die Basilarfasern wie Pendel verhalten.

Der Helmholtzsche Vergleich der Resonatoren mit Saiten ergibt ein anderes Bild; denn die Eigenfrequenz schwingender Saiten nimmt mit der Amplitude zu (40). Für die bei größeren Amplituden zu hoch gestimmte Saite (Basilarfaser) tritt darum eine tiefer gestimmte ein, das heißt, wir erhalten die Empfindung, daß der Ton beim Verstärken in die Tiefe geht, genau so wie es der untersuchten Erscheinung entspricht. Die Basilarfasern erfahren also bei Vergrößerung der Amplitude eine ähnliche Veränderung wie die der Saiten von einem Monochord oder von Seiteninstrumenten. Es genügt in bezug auf unser Phänomen demnach nicht, im Ohre irgendwelche Resonatoren für die Klanganalyse anzunehmen, sondern von den Resonatoren muß ausdrücklich gefordert werden, daß sie sich in bezug auf Inkonstanz der Eigenfrequenz qualitativ so verhalten wie zwischen feste Enden gespannte Saiten.

Ein Vergleich der Resonatoren mit Stimmgabeln wäre ebensowenig möglich wie der mit Pendeln; denn genau wie beim Pendel nimmt auch bei Stimmgabeln die Schwingungsdauer durch die

Amplitudenvergrößerung ab (und nicht zu, wie es bei den schwingenden Saiten der Fall ist). (Über Stimmgabeln und schwingende Metallfedern vergleiche Hartmann-Kempf (32).)

Eine weitere Frage ist jetzt: welche Ursachen hat die Veränderung der Schwingungsdauer einer Saite und in welcher Weise gestaltet sie sich?

3. Mathematische Behandlung

Bei der mathematischen Behandlung der schwingenden Saite nimmt man die physikalisch einfachsten Bedingungen an. Vor allem setzt man stets sehr kleine Amplituden voraus. Solche Vereinfachung ist aber nicht mehr erlaubt, wenn die sekundären Klangerscheinungen mathematisch gefaßt werden sollen. Will man größerere Annäherung an die tatsächlich vorhandenen Verhältnisse erlangen, so stößt man aber auf mathematische Schwierigkeit. So hat man das Problem der periodischen Schwingungen bei größerer Amplitude zunächst an den Schwingungen eines Massenpunktes mathematisch zu lösen versucht.

Die Schwingungsgleichung für ungedämpfte freie Schwingungen eines Massenpunktes

$$1) \qquad \ddot{x} + \alpha x = 0$$

gilt nur für hinreichend kleine Amplituden. Da es sich bei unseren Versuchen um Töne von beträchtlichen Lautstärken handelt, müssen wir jedoch die bei Gleichung 1) vernachlässigten Glieder höherer Potenzen von x berücksichtigen, und haben die Bewegungsgleichung anzusetzen in der Form

$$2) \qquad \ddot{x} + \alpha x - \beta x^2 - \gamma x^3 = 0$$

Diese Gleichung läßt sich mittels elliptischer Funktionen integrieren, aber ihre Lösung ist nicht in für die Zahlenrechnung geeignete Form allgemein explizit durch α, β, γ und die Anfangsbedingungen darzustellen. Deshalb begnügt man sich mit dem angenäherten Integral der beiden Gleichungen

$$3a) \qquad \ddot{x} + \alpha x - \beta x^2 = 0$$

$$3b) \qquad \ddot{x} + \alpha x - \gamma x^3 = 0$$

Gleichung 3a) stellt den mathematisch unsymmetrischen Fall dar, bei dem also die rücktreibende Kraft bei gleichem absoluten

Betrag der Elongation für Elongationen nach der $+x$-Richtung und der $-x$-Richtung verschieden groß ist. Die Unsymmetrie kann nötigenfalls durch Zeichenwechsel des quadratischen Gliedes beim Durchgang des Massenpunktes durch seine Ruhelage beseitigt werden. Gleichung 3b) bezeichnet man als den symmetrischen Fall.

Unsymmetrischer Fall. Die angenäherte Lösung der Gleichung 3a) von G. Duffing (34) lautet vereinfacht

$$4a) \quad x = \frac{\alpha}{\beta} h \frac{1}{12} \left[6h + \sin\left\{\sqrt{a}\,(1 - 60h^2)\,t\right\}\right]$$

Dabei ist:

$$h = \frac{a}{8b}; \quad a = \frac{v}{\sqrt{\alpha}}; \quad b = \frac{3\alpha}{2\beta}$$

und v ist eine Größe, die von den Anfangsbedingungen abhängt.

Bei Vernachlässigung des quadratischen Gliedes beträgt die Eigenfrequenz des schwingenden Massenpunktes wie bekannt $\lambda = \sqrt{\alpha}$. In Gleichung 4a) ist die Frequenz $\lambda = \sqrt{\alpha}\,(1-60h^2)$. Die Klammer $(1-60h^2)$ ist als Korrektionsfaktor für die Frequenz bei endlicher Amplitude gegenüber der Frequenz für sehr kleine Amplitude anzusehen. Der Korrektionsfaktor ist stets kleiner als 1, weil h in zweiter Potenz vorkommt.

Mit anderen Worten: Die Berücksichtigung des quadratischen Gliedes ergibt stets eine Verkleinerung, nie eine Vergrößerung der Eigenfrequenz des schwingenden Massenpunktes.

Symmetrischer Fall. Gleichung 3b) ergibt vereinfacht

$$4b) \quad x = 4\sqrt{\frac{2\alpha}{\gamma}}\,\sqrt{\alpha}\,(1 + h)\,\sin\left[\sqrt{\alpha}\,(1 - 12h)\,t\right]$$

wobei $$h = \frac{a^2}{16c^2}; \quad a = \frac{v}{\sqrt{\alpha}}; \quad c = \sqrt{\frac{2\alpha}{\gamma}}$$

demnach ist nach Gleichung 3b) die durch Berücksichtigung des kubischen Gliedes veränderte Eigenfrequenz

$$\lambda = \sqrt{\alpha}\left(1 - \frac{3\gamma v^2}{8\alpha^2}\right)$$

Hierbei ist v wieder eine von den Anfangsbedingungen abhängige Größe. Der Korrektionsfaktor (die Klammer) ist größer oder kleiner als 1, je nachdem γ kleiner als 0 oder größer als 0 ist.

Mit anderen Worten: Die Berücksichtigung des kubischen Gliedes $(-\gamma x^3)$ ergibt eine Vergrößerung der Eigenfrequenz,

wenn $\gamma < 0$, sie ergibt eine Verkleinerung der Eigenfrequenz wenn $\gamma > 0$ ist, wie übrigens von vornherein plausibel ist, da im ersten Fall die rücktreibende Kraft für gleiche Werte von x größer im zweiten kleiner ist als in dem einfachen Fall, wo $\gamma = 0$ ist.

Bei Berücksichtigung der Dämpfung erhalten wir gegenüber den Schwingungen ohne Dämpfung ein Korrektionsglied, dessen Einfluß auf die Größe des Ausschlages für uns unwesentlich ist.

Im Ohrinnern haben wir es nicht mit einem schwingenden Massenpunkte zu tun, sondern mit einem ausgedehnten schwingenden System, welches in ihrer Wirkung mit einer schwingenden Saite zu vergleichen ist. Helmholtz (35) behandelt das Problem der einseitig gespannten Membran (Basilarmembran) rechnerisch und kommt zu dem Resultat: „Die Bewegung der Membran ist also dieselbe als wenn sie aus einer Reihe nebeneinanderliegender Saiten bestünde." E. Budde (36) führt die Rechnung unter vereinfachten Bedingungen durch.

Da bei schwingenden Saiten erfahrungsgemäß durch die Amplitudensteigerung eine Tonerhöhung eintritt, muß, wie wir aus der Diskussion der Lösungen sehen, in den oben behandelten Schwingungsgleichungen das quadratische Glied zurücktreten gegen das kubische Glied, wenigstens sofern nicht beim quadratischen Glied noch Zeichenwechsel angenommen wird, und der Koeffizient des kubischen Gliedes muß für Saitenschwingungen negatives Vorzeichen haben. Dasselbe muß also auch für die „Saiten" der Basilarmembran angenommen werden. Für die qualitative Auswertung genügt uns demnach die Bewegungsgleichung 3 b), wobei $\gamma < 0$. (Weitere Literatur über das Problem der periodischen Schwingungen unter Berücksichtigung endlicher Amplituden vgl. 36—39.)

Anläßlich der Untersuchung von Tonhöhe und Dämpfung schwingender Saiten in Flüssigkeiten hat H. Martin (40) Resonanzkurven schwingender Saiten in Luft bei verschiedener Amplitude experimentell bestimmt und verglichen mit theoretischen Resultaten, welche E. V. Appleton (41) aus der Ansatzgleichung gewann:

$$5) \qquad \ddot{x} + \chi \dot{x} + \alpha x - \gamma x^3 = k \sin \omega t.$$

Die experimentell und die theoretisch gefundenen Kurven stimmen gut überein. Bei geringer Amplitude liegt das Maximum der Resonanzkurve etwa bei $\omega = \sqrt{\alpha}$, mit wachsender Amplitude verschiebt sich das Maximum des Ausschlages nach der Seite $\omega > \sqrt{\alpha}$.

Für eine schwingende Saite berechnet Martin den Wert γ der Gleichung 5) zu

$$\gamma = -\frac{E\pi^4}{3sl^4}$$

Dabei ist E = Elastizitätsmodul, s = Dichte und l = Länge der Saite. γ ist also für Saiten tatsächlich negativ und wird für eine Stahlsaite berechnet zu $\gamma = -5{,}3 \cdot 10^7$ (im C-G-S-System).

Die beschriebenen mathematischen Ergebnisse wurden aus den versuchsweisen Ansätzen für schwingende Massenpunkte erhalten. Eine gegenüber dieser formalen Rechnung die physikalischen Verhältnisse und Ursachen der Frequenzänderung von Saiten bei wachsender Amplitude mehr berücksichtigende Berechnung ergibt sich nach Martin etwa folgendermaßen.

Infolge der Elongation vergrößert sich die Spannung einer Saite. Mit zunehmender Spannung vermehrt sich ihre Schwingungszahl, und zwar verhalten sich die Schwingungszahlen wie die Wurzeln aus den zugehörigen Spannungen.

N sei die Frequenz bei unendlich kleiner Amplitude,
P ist die Spannung der ruhenden Saite,
N_a sei die Frequenz bei endlicher Amplitude a,
P_a ist die Spannung bei der Amplitude a.

Dann ist $\frac{N_a}{N} = \sqrt{\frac{P_a}{P}}$, wobei $N_a > N$; $P_a > P$, und es ist in erster Annäherung

$$\frac{N_a}{N} = 1 + {}^1/_2 \frac{\triangle P}{P},$$

dabei bedeutet $\triangle P = P_a - P$. Also ist, wenn $\triangle N = N_a - N$,

$$6) \qquad \frac{\triangle N}{N} = {}^1/_2 \frac{\triangle P}{P}$$

Die Schwingungszahl einer Saite ist $N = \frac{1}{2 \cdot e} \cdot \sqrt{\frac{P}{qs}}$, also ist

$$7) \qquad P = 4l^2 qsN^2$$

Es ist hierbei q der Querschnitt der Saite.

Der Elastizitätsmodul ist $E = \frac{\triangle P l}{\triangle l q}$, wobei $\triangle l$ die Saitenverlängerung bedeutet, dann ist die Spannungsänderung

$$8) \qquad \triangle P = \frac{E \triangle l q}{l}$$

Amplitude zunimmt, stimmt also in seiner Qualität überein mit den Ergebnissen unserer Versuche, welche in Abb. 5 (S. 61) dargestellt sind.

Lassen wir in Gleichung 11) die Ausgangsfrequenz N variieren, nehmen aber dafür die Schwingungsamplitude a als konstant an, so erhalten wir die relative Frequenzänderung $\frac{\triangle N}{N}$ als Funktion der Ausgangsfrequenz N in der Form

$$12) \qquad \frac{\triangle N}{N} = \left(\frac{E \pi^2 a^2}{32 s l^4}\right) \frac{1}{N^2}$$

Das heißt, die relative Frequenzänderung ist umgekehrt proportional dem Quadrat der Ausgangsfrequenz — aber nur unter der Voraussetzung, daß E, a, s und l konstant sind.

Diese Voraussetzung trifft jedoch nicht zu, wollten wir obige Beziehung auf die Verhältnisse (Basilarmembran) im Ohre anwenden. Bei einer Änderung der Frequenz N wird nicht stets dieselbe Basilarfaser zur Empfindungsaufnahme beansprucht, sondern für jedes N kommt eine andere Faser zur Klangaufnahme in Frage. Mit dem Wechsel der Fasern ändern sich die Größen E, a, s und l. Eine wesentliche Änderung von E und s (des Elastizitätsmoduls und der Dichte der Fasern) wird zwar allem Anschein nach kaum in Frage kommen, aber die Länge l der Fasern wächst von der Nähe des ovalen Fensters an bis zur Schneckenspitze hin auf das 8fache. Die Änderung von l^4 ist dementsprechend erheblich größer. Über die Amplitude a der verschiedenen Fasern und über die relative Amplitudenverschiedenheit der verschiedenen Fasern bei je derselben subjektiven Lautstärke von Tönen verschiedener Höhe ist bisher nichts bekannt. Die Gleichung 12) ist also für unsere Zwecke nicht ohne weiteres brauchbar trotz der auffälligen Analogie dieser Funktion zu den Ergebnissen unserer Versuche wie sie Abb. 6 (S. 62) darstellt. In beiden Fällen — sowohl bei den Versuchsergebnissen (Abb. 6) als auch bei dem rechnerischen Ergebnis (Gleichung 12) — erhielten wir die umgekehrte Proportionalität: Je kleiner die Schwingungszahl N ist, um so größer ist bei gleichbleibender Stärkedifferenz die relative Frequenzänderung $\frac{\triangle N}{N}$. Zur Diskussion der Gleichung 12) — bezogen auf die Verhältnisse an der Basilarmembran — können wir demnach nur sagen, daß sich die

Größe $\frac{a^2}{l^4}$ bei variablem N höchstens in dem Maße ändern darf, daß noch eine umgekehrte Proportionalität in dem obengenannten Sinne bestehen bleibt. Weitere Aussagen können vorerst nicht gemacht werden.

Zusammenfassung

Von J. R. Ewald wird unter mannigfachen Einwänden gegen die Helmholtzsche Resonanztheorie des Hörens die Abhängigkeit der Tonhöhenempfindung von der Lautstärke als besonders schlagend hingestellt.

In vorliegender Arbeit werden über die bisher als nicht eindeutig befundene Erscheinung der empfundenen Tonhöhenänderung systematische Untersuchungen mit Tönen von 120 bis 4000 Hertz und verschiedene Lautstärken an 29 Vpn. durchgeführt.

Zur Tonerzeugung dienen elektrische Schwingungskreise, welche in Verbindung mit einem Geräuschmesser nach Barkhausen, mit einem Röhrenvoltmeter und mit Interferenzröhren nach Grützner und Sauberschwarz genaue Kontrolle und Regulierung der Tonhöhe, Lautstärke und Klangzusammensetzung der benutzten Töne bzw. Klänge gestatten.

Es wird besonderes Gewicht darauf gelegt, den physiologisch bedingten Anteil der Erscheinung von den durch Inkonstanz der Tonquelle physikalisch und von den durch Vorhandensein von Obertönen psychologisch verursachten Wirkungen zu trennen, und zahlenmäßig die Art und Stärke der Erscheinung bei Verwendung verschiedener Lautstärken und Tonhöhen zu ermitteln.

Die Versuche mit reinen Tönen ergeben, daß bei sehr geringer Lautstärke durch Amplitudenvergrößerung in vielen Fällen Erhöhung und in einigen Fällen Erniedrigung oder gar keine Änderung der empfundenen Schwingungszahl eintritt. Die Erhöhung beträgt im Höchstfall $^1/_{16}$ Ton und ist als psychologisch verursacht anzusehen.

Bei mittleren und lauten Tönen wird durch Amplitudenzunahme stets eine Vertiefung bewirkt. Die Vertiefung nimmt mit der Lautstärke zu. Sie besitzt je nach Umständen eine Größe bis zu $^1/_2$ Ton.

Das Phänomen der Vertiefung nimmt zwischen 200 und 3000 Hertz mit Zunahme der objektiven Schwingungszahl ab.

An verschiedenen Vpn. kann die empfundene Tonvertiefung bis um 100 % verschieden ausfallen.

Vorhandene Obertöne verursachen bei sehr leisen Tönen größtenteils eine Zunahme der empfundenen Erhöhung bzw. Abnahme der empfundenen Vertiefung, bei mittleren Lautstärken eine Vermehrung und bei sehr lauten Tönen eine Verminderung der Tonvertiefung.

Die Ergebnisse früherer Versuche scheinen sich obigen Versuchsergebnissen ungezwungen einzureihen.

Die erwähnte Tonvertiefung entsteht im linken und im rechten Ohre getrennt.

Die Schwingungszahl der Kombinationstöne besteht aus Kombination der objektiv vorhandenen und nicht der subjektiv empfundenen Schwingungszahlen der Primärtöne.

Ferner wird bei lauten Tönen neben dem vertieft empfundenen primären Ton ein zweiter noch etwas tieferer der Empfindung nach den Kombinationstönen ähnlicher Ton („Sekundärton") gehört, der sich bis um 4,5 % Schwingungen (etwa $^3/_8$ Ton) vom ersteren unterscheidet. Der Unterschied nimmt mit der Lautstärke zu.

Im Zusammenhang mit der Lautstärkemessung zeigen Orientierungsversuche die Möglichkeit einer — in Analogie zu den von A. Gibsone durchgeführten Untersuchungen über heterochromatische Photometrie stehenden — vergleichenden Stärkemessung von Tönen verschiedener Höhen („heterotone Phonometrie").

Das Phänomen der Tonvertiefung muß man, wenn nicht ganz auf eine Hörtheorie der peripheren Organe verzichtet werden soll, als physiologisch im Ohrinneren verursacht ansehen, wie auch Ewald es tut. Es kann als eine Folge der Veränderung der Eigenfrequenz der Resonatoren im Ohre durch Intensitätsänderung der Erregung gedeutet werden.

Allerdings verhalten sich die Ohrresonatoren nicht in der Weise, daß ihre Eigenfrequenz mit zunehmender Amplitude abnimmt, wie das z. B. beim Pendel und bei Stimmgabeln der Fall ist, sondern die Wirkung der Amplitudenänderung erscheint als eine natürliche Folge der Helmholtzschen Resonanztheorie, welche die Ohrresonatoren mit zwischen festen Enden schwingenden Saiten vergleicht; denn die Eigenfrequenz von Saiten nimmt mit der Amplitude zu. Wegen der Erhöhung der Eigenfrequenz der Basilarfasern (Saiten) bei Zunahme der Erregung muß für den richtigen Resonator — entgegen der Annahme von Ewald —

ein tiefer gestimmter eintreten. Für die Empfindung tritt also durch Lautstärkesteigerung die durch vorliegende Versuche bestätigte Tonvertiefung auf.

Berechnungen über Tonhöhen schwingender Saiten nach H. Martin, bezogen auf die Verhältnisse im Ohr, stimmen qualitativ mit den Ergebnissen obiger Untersuchungen — soweit ein Vergleich der Versuchsergebnisse mit den theoretischen Resultaten erlaubt ist — überein.

Die Versuche wurden im physikalischen Institut der Universität zu Marburg, dessen Direktor, Professor Dr. E. Grüneisen, ich für Überlassung von Institutsmitteln und sein Interesse zu Dank verpflichtet bin, auf Anregung von Prof. Dr. F. A. Schulze vom Verfasser durchgeführt. An dieser Stelle sei es mir gestattet, meinem verehrten Lehrer Herrn Prof. Dr. F. A. Schulze für seine Anregungen und sein stets reges Interesse für die Arbeit meinen herzlichen Dank auszusprechen. Gleichfalls sage ich Herrn Dr. Ed. Justi für die wirksame Unterstützung beim Bau der Apparatur und ebenso allen Damen und Herren, die sich den Versuchen freundlicherweise zur Verfügung stellten, meinen aufrichtigen Dank.

Literaturverzeichnis

(1) Wilh. Weber, *Pogg. Ann.* **14** (1828), S. 397.
(2) S. Ringer, *Pogg. Ann.* **118** (1863), S. 636.
(3) Sticker, *Pogg. Ann.* **121** (1864), S. 335.
(4) E. Mach, *Sitzgber. Akad. Wiss. Wien, Math.-naturwiss. Kl.* **50**. 2. Abtlg., S. 342.
(5) —, *Pogg. Ann.* **126** (1865), S. 331.
(6) Aberle, Diss. Tübingen 1868.
(7) Hessler, *Arch. f. Ohrenheilk.* **18** (1882), S. 227.
(8) Urbantschitsch, *Pflügers Arch.* **31** (1883), S. 280.
(9) C. Stumpf, Tonpsychologie, Bd. I (1883), S. 236 u. 253.
(10) C. V. Burton, *Philosophic. Mag.* **39** (5) (1895), S. 447.
(11) A. Broca, *C. r. Sci.* **124** (1897), S. 1512.
(12) —, *C. r. Biol.* **10** (4) (1897), S. 652.
(13) P. Bonnier, *C. r. Biol.* **10** (4) (1897), S. 678.
(14) J. R. Ewald, *Pflügers Arch.* **76** (1899), S. 147.
(15) — und G. A. Jäderholm, *Pflügers Arch.* **124** (1908), S. 29.
(16) H. Held und F. Kleinknecht, *Pflügers Arch.* **216** (1927), S. 1. Bericht der math.-phys. Kl. der sächsischen Akademie der Wissenschaften **77**. Sitzung vom 2. 11. 1925.
(17) E. Grüneisen und E. Merkel, *Z. S. f. Physik* **2** (1920), S. 277.
(18) Weller, *Jahrb. Drahtl. Tel.* **14** (1919), S. 599.
(19) H. Barkhausen, *Z. S. f. Techn. Phys.* 1926, S. 599.

(20) H. Fassbender und K. Krüger, *Z. S. f. Techn. Phys.* 1927, S. 277.
(21) Carl Stumpf, Sprachlaute, Berlin 1926.
(22) H. Barkhausen und G. Lewicki, *Physik. Z.* S. 25 (1924), S. 534.
(23) — und Tischner, *Z. S. f. techn. Phys.* 8 (1927), S. 215.
(24) H. Fletcher und J. C. Steinberg, *Phys. Rev.* **24** (1924), S. 306.
(25) E. Schrödinger, *Ann. d. Phys.* **63** (1920), S. 397, 427, 481. Cl. Schaefer, *Phys. Z.* **26** (1925), S. 58.
(26) A. Gibsone, Diss. Marburg 1925, Untersuchung über die Grundlagen der heterochromatischen Photometrie und der Ostwaldschen Farbenlehre. Auch: Cl. Schaefer, Lit.-Nr. 25.
(27) H. Fletcher, *J. Frankl. Inst.* (1923), S. 289.
(28) Kingsbury, *Phys. Rev.* **29** (1927), S. 588.
(29) MacKenzie, *Phys. Rev.* **20** (1922), S. 331.
(30) F. A. Schulze, *Ann. d. Phys.* **31** (1910), S. 1.
(31) V. O. Knudsen, *Phys. Rev.* **21** (1923), S. 84.
(32) Hartmann-Kempf, Diss. Würzburg 1902.
(33) E. Budde, *Phys. Z.* **18** (1917), S. 225 und 259.
(34) G. Duffing, Sammlung Vieweg, Tagesfragen aus den Gebieten der Naturwissenschaft und der Technik, Heft 41/42, 1918, „Erzwungene Schwingungen".
(35) Helmholtz, Lehre von den Tonempfindungen, Beilage XI.
(36) E. Budde, Handbuch der Biologischen Arbeitsmethoden, Abt. V, Teil 7, Heft 1 Mathematische Theorie der Gehörsempfindung (1920).
(37) F. A. Schulze, *Ann. d. Phys.* **9** (1902), S. 1111.
(38) J. Horn, *Z. S. f. Math. u. Phys.* **47** (1902), S. 400; **49** (1903), S. 246; **48** (1903), S. 400; **52** (1905), S. 1.
(39) R. H. Weber und R. Gans, Rep. der Physik, Bd. I S 203 bis 205. Teubner 1915.
(40) H. Martin, *Ann. d. Phys.* **47** (1925), S. 627.
(41) E. V. Appleton, *Philosophic. Mag.* **47** (1924), S. 609.
(42) J. O. Thompson, *Wied. Ann.* **44** (1891), S. 555. — C. Bach, Mitt. üb. Forschungsarb. a. d. Geb. d. IngenieurW. Heft 9 (1903), S. 70. — F. Grüneisen, Verhandlungen der deutschen physikalischen Gesellschaft **4** (1906), S. 469. — F. A. Schulze, *Ann. d. Phys.* **31** (1910), S. 1.
(43) E. R. Jaensch, Untersuchungen über Grundfragen der Akustik und Tonpsychologie. Leipzig, J. A. Barth. 1929.
(44) G. v. Békésy, *Physikal. ZS.* **29** (1928), S. 793; **30** (1929), S. 118 u. 721.
(45) E. R. Neumann, Vorlesungen zur Einführung in die Relativitätstheorie. Jena, G. Fischer. 1922.
(46) E. R. Jaensch, Eidetik. Leipzig, Quelle und Meyer. 1927.
(47) H. Koch, Die Ewaldsche Hörtheorie. *Z. Sinnesphysiol.* **59** (1928), S. 15.

Lebenslauf

Als Sohn des Pfarrers Georg Zurmühl und seiner Ehefrau Bertha geb. Stähle wurde ich, Georg Friedrich Zurmühl, in Burg (Wupper) Kreis Lennep am 1. 3. 02 geboren. Ich besitze die preußische Staatsangehörigkeit und bin evangelischen Bekenntnisses. Ab Ostern 1908 besuchte ich die evg. Volksschule zu Burg (Wupper). Ostern 1912 trat ich in die Sexta des Realgymnasiums zu Solingen ein. Weihnachten 1918 verließ ich wegen Besetzung des Schulgebäudes durch die Besatzungstruppen das Realgymnasium und besuchte ab Januar 1919 die Oberrealschule zu Remscheid, welche ich im Jahre 1923 mit dem Zeugnis der Reife verließ. W.-S. 1923/24 begann ich das Studium für Maschinenwesen an der Technischen Hochschule zu Hannover. Bis einschließlich W.-S. 1924/25 war ich bei der Fakultät für Maschinenwesen in Hannover eingeschrieben. Seit S.-S. 1925 studiere ich reine und angewandte Mathematik, Physik und Philosophie. S.-S. 1925 und W.-S. 1925/26 studierte ich an der Universität zu Kiel und seit S.-S. 1926 bis S.-S. 1929 gehörte ich der Philosophischen Fakultät der Universität zu Marburg an. Ende des W.-S. 1926/27 legte ich die staatl. Turn-, Sport- und Schwimmlehrerprüfung und die Prüfung zur Lehrbefähigung im orthopädischen Schulturnen an der Marburger Universität ab. Von S.-S. 1927 bis W.-S. 1928/29 war ich an der vorliegenden Arbeit beschäftigt. Das Rigorosum bestand ich am 31. 7. 29. Seitdem hielt ich mich zwecks Ablegung des wissenschaftlichen Staatsexamens in Marburg auf. Das Staatsexamen bestand ich am 21. 2. 30. Zum 1. April 1930 gedenke ich in den staatlichen Schuldienst einzutreten.

Meine akademischen Lehrer waren

in Hannover: Erdmann, Goebel, Keppler, L. Klein, Kohlrausch, Cranz, Conr. Müller, Nachtweh, Neumann, Precht, Pröll, Salkowski;

in Kiel: von Brockdorf, Dieterici, H. Geiger, Th. Schmidt, Scholz, Steinitz, Toeplitz, Zahn.

in Marburg: Fraenkel, Frank, Gküneisen, Hensel, Jaeck, Jaensch, Krafft, Luckey, Mahnke, E. R. Neumann, F. A. Schulze, Senftleben.

Ihnen allen, insbesondere Herrn Prof. Dr. F. A. Schulze, bin ich zu großem Dank verpflichtet.